



TESIS - TE142599

REDUKSI KABUT PADA CITRA KAWAH GUNUNG BERAPI KELUD BERBASIS DARK CHANNEL PRIOR

ODDY VIRGANTARA PUTRA
2215205013

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng.
Dr. Eko Mulyanto Yuniarno, S.T., M.T.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN JARINGAN CERDAS MULTIMEDIA
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017



TESIS - TE142599

REDUKSI KABUT PADA CITRA KAWAH GUNUNG BERAPI KELUD BERBASIS DARK CHANNEL PRIOR

ODDY VIRGANTARA PUTRA
2215205013

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng.
Dr. Eko Mulyanto Yuniarno, S.T., M.T.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN JARINGAN CERDAS MULTIMEDIA
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017

LEMBAR PENGESAHAN

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T.)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

Oddy Virgantara Putra
NRP. 2215205013

Tanggal Ujian : 15 Juni 2017
Periode Wisuda: September 2017

Disetujui oleh:

1. Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng. (Pembimbing I)
NIP: 195809161986011001

2. Dr. Eko Mulyanto Yuniarno, S.T., M.T. (Pembimbing II)
NIP: 196806011995121009

3. Dr. Supeno Mardi Susiki Nugroho, S.T., M.T. (Penguji)
NIP: 197003131995121001

4. Dr. Diah Puspito Wulandari, S.T., M.Sc. (Penguji)
NIP: 198012192005012001

Dekan Fakultas Teknologi Elektro

Dr. Tri Arief Sardjono, S.T., M.T.
NIP: 197002121995121001

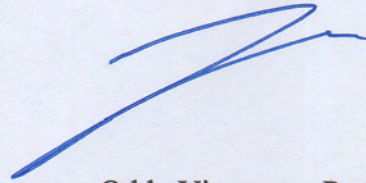
Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul **“REDUKSI KABUT PADA CITRA KAWAH GUNUNG BERAPI KELUD BERBASIS *DARK CHANNEL PRIOR*”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 15 Mei 2017



Oddy Virgantara Putra

NRP.2215205013

Halaman ini sengaja dikosongkan

REDUKSI KABUT PADA CITRA KAWAH GUNUNG BERAPI KELUD BERBASIS *DARK CHANNEL PRIOR*

Nama mahasiswa : Oddy Virgantara Putra
NRP : 2215205013
Pembimbing : 1. Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng.
2. Dr. Eko Mulyanto Yuniarno, S.T., M.T.

ABSTRAK

Danau kawah gunung berapi aktif Kelud telah terbentuk kembali setelah letusan pada bulan Februari 2014. Beberapa indikator aktivitas gunung berapi adalah adanya perubahan warna, kemunculan gas sulfatara dari sekitar kawah, dan kenaikan ketinggian air kawah. Pengawasan dengan menggunakan kamera CCTV terus dilakukan selama 24 jam. Tujuan utama dari kegiatan pengawasan ini adalah memonitor aktivitas gunung berapi. Hampir setiap saat kondisi kawah tertutup oleh kabut asap sehingga menyulitkan pengawas untuk melakukan observasi terhadap gunung Kelud.

Oleh karena itu, dalam penelitian ini metode *color attenuation prior* berbasis *dark channel prior* digunakan untuk mengurangi ketebalan kabut. Metode ini menggunakan estimasi peta transmisi dengan menggunakan model kedalaman yang berkorelasi positif antara kedalaman dengan saturasi dan kecerahan. Metode regresi linier *least-squared estimation* digunakan untuk menentukan parameter koefisien dari model kedalaman. Setelah dilakukan reduksi kabut, kontras dan kecerahan dievaluasi dengan cara mengukur perubahan nilainya. Hasilnya adalah bahwa citra kawah gunung berapi setelah dilakukan reduksi kabut mengalami kenaikan kontras rata-rata sebesar 0.1078 dan penurunan nilai kecerahan sebesar -0.0662.

Kata kunci: *dark channel prior*, gunung berapi, *least-squared estimation*, peta kedalaman, reduksi kabut

Halaman ini sengaja dikosongkan

HAZE REMOVAL OF KELUD VOLCANO IMAGE BASED ON DARK CHANNEL PRIOR

By : Oddy Virgantara Putra
Student Identity Number : 2215205013
Supervisor(s) :
1. Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng.
2. Dr. Eko Mulyanto Yuniarno, S.T., M.T.

ABSTRACT

The crater lake of Kelud active volcano has reformed after the eruption in February 2014. Several indicators of volcanic activity are the presence of color changes, the emergence of sulfate gases from around the crater, and the rise in the water level of the crater. A supervision was conducted by using CCTV cameras continued for 24 hours. The main purpose of this monitoring activity is to monitor volcanic activity. Almost every time the condition of the crater is covered by smog so that makes it difficult for the observers to make observation on the mountain Kelud.

Therefore, in this research we use a method called color attenuation prior based on dark channel prior to reduce fog thickness. This method uses the transmission map estimation by using a depth model that correlates positively between depth with its saturation and brightness. To determine the coefficient parameters of our depth model we use the least-squared estimation linear regression method. We evaluate our results by measuring contrast and brightness changes. The result is that the recovered image of the volcanic crater after the dehazing process has increased value of the average contrast by 0.1078 and the decrease in the brightness value of -0.0662.

Key words: dark channel prior, dehazing, least-squared estimation, transmission map, volcano

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Tesis kami berjudul "REDUKSI KABUT PADA CITRA KAWAH GUNUNG BERAPI KELUD BERBASIS DARK CHANNEL PRIOR" diangkat penulis karena ketertarikan penulis terhadap permasalahan mitigasi bencana alam. Penulis terlahir di kabupaten Kediri di mana lokasi gunung Kelud juga berada cukup dekat dengan tempat tinggal penulis. Selain itu, penulis juga merasa terpanggil untuk berkontribusi secara nyata untuk membantu pemerintah secara khusus dan masyarakat Kediri secara umum. Tesis ini sendiri secara umum berisi tentang bagaimana menanggulangi gangguan pemantauan kawah gunung berapi Kelud yang tertutup oleh kabut. Penelitian ini sangat berguna untuk masyarakat Indonesia. Selain itu, penelitian ini merupakan penelitian pertama dalam dunia visi komputer dan pengolahan citra untuk membantu mitigasi bencana alam. Selama ini, penelitian terkait gunung berapi hanya berkisar untuk wilayah keilmuan seperti: geologi, kimia, dan meteorologi. Tentunya, sebagai penelitian yang pertama tidak lepas dari banyak kekurangan. Penulis berharap bahwa ke depan penelitian ini tidak berhenti sampai di sini. Estafet penelitian ini harus disalurkan dan diteruskan dengan baik oleh para peneliti yang tertarik dengan ini. Karena, masih banyak hal yang bisa dilakukan untuk mengembangkan penelitian terkait mitigasi bencana alam. Kami juga berharap penelitian ini bisa membantu Pengawas Gunung Api (PGA) dalam menjalankan tugasnya. Semoga adanya Tesis ini dapat memberikan manfaat bagi khasanah pengetahuan di visi komputer dan vulkanologi pada umumnya dan masyarakat Kediri pada khususnya.

Puji syukur penulis haturkan kepada Allah Tuhan Yang Maha Esa, karena atas segala rahmat dan anugerah-Nya sehingga Tesis yang berjudul: "REDUKSI KABUT PADA CITRA KAWAH GUNUNG BERAPI KELUD BERBASIS DARK CHANNEL PRIOR" dapat diselesaikan tepat pada waktunya. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat mencapai gelar Magister Teknik pada Fakultas Teknologi Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai

pihak selama menyelesaikan tesis ini, tesis ini tidak akan mungkin dapat penulis selesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih sedalam dalamnya kepada para pihak:

1. Kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) yang telah membiayai penuh pendidikan magister penulis di Jaringan Cerdas Multimedia Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
2. Bapak Eko Prasetyo, bapak Abdul Kahar, bapak Mokhamad Mahdum, bapak Syahrul Elly, dan bapak M. Sofwan Efendi selaku direksi LPDP terima kasih atas segala upaya dan dukungan kepada penulis demi kelancaran penelitian ini.
3. Bapak Dr. Tri Arief Sardjono, ST., MT., selaku Dekan Fakultas Teknologi Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember;
4. Bapak Dr. I Ketut Eddy Purnama, S.T., M.T., selaku Ketua Program Magister Jaringan Cerdas Multimedia Institut Teknologi Sepuluh Nopember;
5. Bapak Prof. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng. Ph.D., selaku dosen pembimbing pertama yang telah dengan begitu baik dan dengan penuh kesabaran memberikan bimbingan kepada penulis, menyediakan waktu, tenaga, serta pikiran demi mengarahkan penulis dalam menyelesaikan Tesis ini;
6. Bapak Dr. Eko Mulyanto Yuniarno, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing kedua kami yang telah begitu baik membimbing, berdiskusi dengan gaya yang khas sedikit membentak-bentak. Justru dengan ini, penulis bisa terbuka pikiran dan wawasan tentang langkah awal sebagai seorang peneliti.
7. Bu Ratna Prabandari dan pak Lukmanul Hakim, selaku penanggung jawab monev LPDP. Terima kasih atas segala upaya dan dukungan kepada penulis.
8. Kepada teman sepasang suami istri pak Faisal dan bu Niya, terima kasih telah menjadi teman curhat, teman nongkrong, dan yang paling penting adalah terima kasih telah mengizinkan penulis untuk tidur sebentar di kontrakkannya.

9. Teman-teman lab Visi Komputer, mbak Nafik, pak Ulin, pak Made, bu Tita, bu Yuhana, bu Rika, pak Yose, terima kasih atas nasehat-nasehat dan suplai makanannya. Sangat bermanfaat bagi penulis. Khusus pak Made terima kasih telah mengizinkan untuk menggunakan *sleeping bag* sebagai alas tidur penulis selama di lab. Tanpa hal itu, penulis tidak akan mampu menyelesaikan buku ini dengan badan yang sehat.
10. Teman-teman seangkatan Yogi, pak Sipan, Vani, Amal, Vika, Adlian, mbak Fitri, Aviv, terima kasih atas dukungan kalian.
11. Teman-teman JCM genap, Afif, Wega, Medi, Adi Keceng, Walid, Trio Kwek-kwek (Dian, Fawaati, dan Mambaus) terima kasih banyak atas waktu kalian untuk bersenda gurau selama ini.
12. Teman-teman CIO dan Telematika, Atyanta terima kasih pinjaman mobilnya, Danu Kurnia, mas Didin, pak Khamid, mbak Fahima, mbak Fula, dan khususnya bu Erna Utami terima kasih semuanya bu atas nasehat dan logistiknya.
13. Teman-teman senior, mas Fawaid, mas Aris, mas Fauzi, dan mbak Citra terima kasih atas petunjuk dan sarannya, mbak Putri hontoni arigatou gozaimashita.
14. Terkhusus Joko Priambodo, terima kasih telah menemani penulis kemanapun penulis pergi, pinjaman motor, dan maaf selama ini jika penulis suka mem-*bully*.
15. Para Dosen Magister Jaringan Cerdas Multimedia Institut Teknologi Sepuluh Nopember, terima kasih kepada Bapak/ Ibu yang telah memberikan ilmunya kepada penulis selama penulis belajar di Magister Jaringan Cerdas Multimedia Institut Teknologi Sepuluh Nopember;
16. Keluargaku tercinta, istri dan anakku, terima kasih atas segala dukungan yang telah kalian berikan sampai hari ini dan semua pencapaian saya selama ini akan saya persembahkan untuk kalian. Pencapaian kali ini sungguh tidak mudah saya dapatkan;
17. Kepada mas Agus Prayitno terima kasih atas ide penelitian ini. ;

18. Kepada rekan-rekan mahasiswa program Doktorat Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember, pak Adri Gabriel, pak Zainal Fanani, bu Yuni, bu Esther, bu Evi, dan bu Ulla terima kasih atas bantuan dan nasehat-nasehatnya. Tanpa kalian, penulis mungkin akan tersesat.
19. Kepada mas Aceng, mbak Herlis, mbak Caca, pak Man, mas Aris terima kasih atas bantuannya. Semoga dilancarkan rejekinya dan barokah umurnya.
20. Pegawai perpustakaan, foto copy, dan semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu terima kasih atas bantuan dan bimbingan kalian semuayang sungguh tidak ternilai, semoga Allah yang membalas kebaikan kalian.

Ponorogo, 28 April 2017

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xxi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Kontribusi	5
1.6 Metodologi Penelitian	5
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA	7
2.1 Kajian Penelitian Terkait	7
2.2 Model Citra Kabut	11
2.3 Hamburan	13
2.4 Pelemahan Langsung	14
2.5 Airlight	16
2.6 Dark Channel	17
2.7 Cahaya Atmosfer	19
2.8 Peta Transmisi	21
2.9 Degradasi Citra	23
2.10 Kecerahan	25
2.11 Saturasi	25
2.12 Kontras	25
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	27
3.1 Dark Channel Prior	28
3.1.1 Pengamatan	28

3.1.2	Model Formula	29
3.1.3	Dark Channel.....	30
3.2	Estimasi Cahaya Atmosfer	31
3.3	Estimasi Peta Transmisi	33
3.3.1	Estimasi Transmisi Berbasis Kedalaman	33
3.3.2	Korelasi Kedalaman, Saturasi, dan Kecerahan.....	35
3.3.3	Least Squares Estimation	40
3.3.4	Strategi Pembelajaran	43
3.4	Pemulihan Citra.....	44
3.5	Evaluasi Kontras.....	45
3.5.1	Kontras <i>Mean Squared Error (MSE)</i>	45
3.5.2	Kontras Michelson.....	45
3.5.3	Kontras Weber.....	46
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		47
4.1	Estimasi Cahaya Atmosfer dari <i>Dark Channel Prior</i>	47
4.2	Estimasi Parameter Model Kedalaman	50
4.3	Estimasi Peta Transmisi	51
4.4	Proses Pemulihan Citra	53
4.5	Analisis Perubahan Visibilitas dan Kontras	57
4.5.1	Perubahan Visibilitas.....	57
4.5.2	Hasil Kontras dan Kecerahan	63
4.6	Kekurangan metode Dark Channel Prior	70
4.6.1	Oversaturasi	71
4.6.2	Efek Halo	72
BAB 5 KESIMPULAN		73
DAFTAR PUSTAKA.....		75
LAMPIRAN		83
BIODATA		85

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Model citra berkabut beserta nama peubah. Di mana I adalah citra berkabut, A adalah cahaya atmosfer, J adalah citra yang dipulihkan, dan t adalah peta transmisi.	13
Gambar 2.2. Gambaran dari partikel yang menghamburkan cahaya. (a) adalah cahaya masuk atau <i>incident light</i> , (b) adalah partikel di atmosfer, (c) adalah cahaya yang dihamburkan, dan (d) adalah cahaya yang tidak mengalami hamburan.....	14
Gambar 2.3. Model dari hamburan volume kecil dari atmosfer. (a) adalah cahaya masuk, (b) adalah volume kecil dari partikel, (c) adalah flux cahaya yang dihamburkan Φ , (d) adalah cahaya yang tidak dihamburkan, dan (e) adalah kamera.	14
Gambar 2.4. Proses terjadinya <i>collimated beam</i> . a berkas cahaya yang masuk menuju partikel, b partikel di atmosfer, c cahaya yang keluar dari partikel, dx ketebalan dari partikel	15
Gambar 2.5. Model fisik dari citra berkabut di gunung Kelud. Di mana a adalah cahaya pantulan dari objek latar, b adalah pelemahan langsung, c adalah <i>airlight</i> , d adalah air danau kawah, e adalah daratan tepi danau, f adalah kamera pemantau, dan g adalah kabut yang berada di atas kawah.....	16
Gambar 2.6. <i>Dark channel</i> dari kondisi kawah gunung api Kelud. (a) adalah citra <i>dark channel</i> dengan kondisi kabut sedikit. (b) adalah citra <i>dark channel</i> dengan kabut agak tebal.....	18
Gambar 2.7. Contoh citra dengan latar beragam warna. (a) adalah citra dengan latar tanaman dan bunga beragam warna, (b) adalah pepohonan dengan beragam warna daun, dan (c) adalah citra reog dengan beragam warna motif kostum.....	18
Gambar 2.8. Citra objek dengan bayangannya. (a) adalah citra bangunan dengan bayangan, (b) adalah citra pepohonan beserta bayangannya, dan (c) adalah citra kendaraan umum dengan bayangannya.	19
Gambar 2.9. Citra dengan objek gelap. (a) adalah citra candi Prambanan dan (b) adalah citra mobil.	19
Gambar 2.10. Cahaya atmosfer dari citra berkabut. (a) adalah cahaya atmosfer dari pemandangan berkabut jalan desa. (b) adalah cahaya atmosfer dari pemandangan berkabut dari area pepohonan. Warna merah pada Gambar 2.10(a) dan Gambar 2.10(b) mewakili area yang diasumsikan sebagai sumber cahaya. ...	20
Gambar 2.11. Contoh peta transmisi dari beragam citra. (a) Peta transmisi dari rumah dan bangunan lain, (b) Peta transmisi dari citra tepi danau, (c) Peta transmisi	

dari citra dengan latar sawah terasiring, (d) Peta transmisi dari candi Borobudur.	22
Gambar 2.12. Vektor warna I adalah kombinasi linier dari J dan A . Di mana R , G , dan B adalah saluran warna merah, hijau, dan biru. Sedangkan I adalah citra berkabut, A adalah cahaya atmosfer, L adalah garis yang menghubungkan titik-titik, dan J adalah citra tanpa kabut.	25
Gambar 3.1. Tahapan metodologi penelitian reduksi kabut.	27
Gambar 3.2. Citra kabut kawah gunung Kelud. (1) adalah citra inputan, (2) adalah hasil estimasi cahaya atmosfer pada citra <i>dark channel</i> , (3) peta transmisi, (a)-(d) adalah citra kawah pada kondisi beragam kondisi beserta citra <i>dark channel</i> dan peta tranmisinya.	32
Gambar 3.3. Korelasi kepadatan kabut dengan saturasi dan kecerahan. (a) adalah citra kawah kelud, (b) adalah sampel blok dengan jarak jauh, (c) sampel blok dengan jarak menengah, (d) sampel blok dengan jarak dekat, (e) grafik perubahan nilai kecerahan pada masing-masing blok, (f) adalah grafik perubahan nilai saturasi pada masing-masing blok. Nomor sampel 1 adalah blok jarak dekat, nomor 2 adalah blok jarak menengah, dan nomor 3 adalah blok jarak jauh	35
Gambar 3.4. Perubahan nilai α untuk tiap-tiap kedalaman. 3-2(a) besar nilai α untuk jarak dekat, 3-2(b) besar nilai α untuk jarak menengah, dan 3-2(c) besar nilai α untuk jarak jauh.	38
Gambar 3.5. Citra tepi dari kawah Kelud dalam kondisi berbeda. (a) adalah citra kawah kelud sebelum pembuatan terowongan, (b) dan (c) adalah citra tepi dari kedalaman dan sobel, (d) adalah citra kawah sesudah pembuatan terowongan, (e) dan (f) adalah citra tepi dari kedalaman dan sobel.	40
Gambar 4.1. Citra <i>dark channel</i> dari kawah gunung berapi Kelud. Intensitas tertinggi cenderung berada pada area kawah.	48
Gambar 4.2. Perbandingan citra <i>grayscale</i> dengan citra <i>dark channel</i> . (a) adalah citra <i>dark channel</i> dengan (c) sebagai bentuk histogramnya. Demikian pula (b) adalah citra <i>grayscale</i> dan (d) sebagai histogramnya.	49
Gambar 4.3. Perbedaan citra rekonstruksi peta kedalaman (a) dan peta transmisi (b)	51
Gambar 4.4. Grafik korelasi antara nilai koefisien hamburan β dengan nilai kontras peta transmisi.	52
Gambar 4.5. Citra kabut dan peta transmisi terkait perubahan koefisien β . (a),(b),(c),(d), adalah citra asli, citra hasil <i>dehazing</i> $\beta = 0.75$, $\beta = 1.0$, $\beta = 1.25$, (e),(f), dan (g) adalah peta transmisi dengan $\beta = 0.75$, $\beta = 1.0$, $\beta = 1.25$	53

Gambar 4.6. Proses <i>dehazing</i> bertahap. Dimulai dari citra masukan (a), kemudian diproses dengan <i>dark channeling</i> (b), estimasi cahaya atmosfer (c), peta kedalaman (d), peta transmisi (e), dan citra keluaran (f).	55
Gambar 4.7. Citra kabut kawah pada kondisi kabut tidak terlalu tebal dengan hasil <i>dehazing</i> (b)-(f) dengan metode DCP (b), NC (c), CAP (d), (e) HGIR, dan (f) hasil kami.....	56
Gambar 4.8. Proses <i>dehazing</i> dengan metode NC (<i>negative correction</i>).	56
Gambar 4.9. Citra <i>dark channel</i> dengan berbagai ukuran jendela blok. (a) jendela blok dengan ukuran 3x3 beserta histogramnya (c). (b) blok berukuran 15x15 dengan histogram (d).....	58
Gambar 4.10. Hasil <i>dehazing</i> dengan estimasi peta transmisi menggunakan persamaan 3.11. Efek halo pada tepi kawah.	58
Gambar 4.11. Hasil reduksi kabut dengan metode DCP [24] dan CAP dari [21].(a),(d),(g) adalah citra asli, (b),(e),(h) adalah citra hasil DCP, (c),(f),(i) adalah citra hasil CAP	59
Gambar 4.12. Citra hasil <i>dehazing</i> pada beragam kondisi. (a) adalah citra asli, (b) hasil DCP, (c) hasil NC, (d) hasil CAP, (e) hasil HGIR, dan (f) hasil PM.....	61
Gambar 4.13. Citra inputan berkabut diperbaiki untuk objek putih kecil. (a) citra kawah dengan tetesan air, (b) citra <i>dark channel</i> , (c) citra hasil <i>patch</i> ulang, (d) hasil setelah <i>patch</i>	63
Gambar 4.14. Grafik histogram dari kondisi citra dengan kondisi kabut sedang sebelum direduksi kabutnya.....	65
Gambar 4.15. Grafik histogram dari kondisi citra dengan kondisi kabut sedang sesudah direduksi kabutnya.....	65
Gambar 4.16. Histogram dari saturasi dan kecerahan untuk citra dengan kondisi kabut sedang sebelum direduksi.....	66
Gambar 4.17. Histogram HSV citra setelah kabut direduksi.	66
Gambar 4.18. Histogram dari citra dengan kabut yang telah direduksi. (a) adalah metode DCP, (b) adalah metode NC, (c) adalah metode HGIR, dan (d) adalah metode yang diajukan PM.....	67
Gambar 4.19. Kabut tebal dari citra kawah. (a) kabut tebal yang terjadi pukul 09.36 WIB dan (b) kabut tebal yang terjadi pukul 16.13 WIB	68
Gambar 4.20. Grafik perubahan standar deviasi antara sebelum dan sesudah <i>dehazing</i> . Garis warna biru adalah perubahan standar deviasi dari citra kabut sedangkan warna merah adalah standar deviasi dari citra setelah <i>dehazing</i>	69

Gambar 4.21. Grafik histogram dari kondisi citra dengan kondisi kabut tipis sebelum direduksi kabutnya.	70
Gambar 4.22. Grafik histogram dari kondisi citra dengan kondisi kabut tipis sebelum direduksi kabutnya.	70
Gambar 4.23. Citra hasil pemulihan dengan metode estimasi peta transmisi pada persamaan 3.11.(a),(b) adalah citra asli, (c),(d) adalah hasil <i>dehazing</i> dengan label waktu, (e),(f) adalah hasil <i>dehazing</i> tanpa label waktu	72
Gambar 5.1. Beberapa citra yang digunakan sebagai data latih untuk LSE. (a) dan (c) adalah citra pemandangan luar, (b) dan (d) adalah citra kedalaman dari citra pemandangan luar terkait.....	83
Gambar 5.2.Beberapa citra yang digunakan sebagai data latih untuk LSE. (a) dan (c) adalah citra pemandangan luar seperti bangunan, (b) dan (d) adalah citra kedalaman dari citra pemandangan luar terkait.....	84

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Ukuran partikel dalam beragam kondisi [33], [37].....	17
Tabel 4.1. Daftar Nilai Intensitas A dalam beragam kondisi kawah.....	49
Tabel 4.2. Tabel Perbandingan Nilai Kontras dan Kecerahan	64

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Gunung Kelud terletak di kabupaten Kediri-Jawa Timur. Berbatasan langsung dengan tiga kabupaten Kediri, Malang, dan Blitar, tepatnya di wilayah tenggara kabupaten Kediri, gunung yang berjenis stratovulkano [1], [2] adalah salah satu gunung berapi yang paling aktif dan berbahaya di Indonesia. Sedikitnya 30 letusan selama enam abad terakhir telah merenggut sekitar 15000 korban[1], [3], sebagian besar disebabkan arus piroklastik, lonjakan, dan terutama lahar, seperti pada letusan 1919 yang mematikan. Gunung ini memiliki tiga puncak, yaitu puncak Gajahmungkur yang berada di sisi barat, puncak Sumbing di sisi selatan, dan puncak Kelud yang berada di sebelah timur. Ditengah-tengah dari ketiga puncak tersebut ada danau kawah yang indah dan eksotis. Danau kawah ini terletak di ketinggian sekitar 1731 meter di atas permukaan laut. Kawah ini dikelilingi oleh sisa-sisa beberapa kubah lava andesitik, yang mempersulit morfologi yang membelah di daerah puncak. Peta geologi telah diperbaiki sejak erupsi tahun 1990 [4], karena tepi atas vegetasi dilepaskan dalam radius 2 sampai 3 km.

Kelud dibangun di sisi barat jajaran vulkanik Kawi-Laksono, yang orientasi barat laut-tenggaranya sejajar dengan sebagian besar rentang vulkanik di Jawa Timur. Dua pinggiran yang berbeda dari amphitheaters berbentuk tapal kuda di sisi barat dan selatan diperkirakan mencerminkan dua kegagalan lereng yang besar dari gunung berapi leluhur [4]. Bagian barat gunung berapi terdiri dari endapan puing-puing-puing, setebal beberapa ratus meter, diturunkan oleh kemiringan lereng sisi barat. Endapan-endapan longsoran ditutupi oleh sebagian besar aliran piroklastik. Tepi barat bagian bawah terdiri dari endapan aliran piroklastik dan piedmonts yang luas dari deposit aliran debris yang mungkin terkait dengan aliran piroklastik proksimal.

Sebelum letusan 2007 terjadi, danau kawah juga pernah ada. Bahkan, danau ini bisa digunakan untuk berenang. Berdasarkan hasil wawancara kami

dengan petugas gunung Kelud, ada beberapa gejala yang muncul menjelang letusan pada 2007. Diantaranya, terjadinya perubahan warna danau kawah dan terjadinya proses pengeluaran gas di area kawah dan sekitar kawah. Efek dari letusan yang terjadi pada tahun 2007 adalah munculnya gundukan bebatuan yang disebut sebagai kubah lava. Selain menjadi pemandangan yang indah keberadaan kawah pada gunung bisa menjadi salah satu indikator adanya aktivitas vulkanik dari gunung tersebut [5]–[7]. Indikasi aktivitas vulkanik yang muncul dari kawah gunung diantaranya adalah gas [5], perubahan warna [6], dan fluktuasi level air danau kawah [7].

Setelah letusan pada 2007, danau itu benar-benar hilang. Tujuh tahun berikutnya, salah satu letusan paling masif, baru-baru ini, telah terjadi pada 14 Februari 2014. Letusan dimulai dengan bensin dan asap pergerakan naik ke langit[8], [9]. Bersamaan dengan itu, guntur mulai bergemuruh di atas gunung. Bahkan, beberapa orang yang berada jauh dari insiden tersebut mendengar suara guntur. Malam itu adalah malam yang gelap dengan pasir dan abu menghujani rumah, mobil, gedung, dan jalan raya. Keesokan pagi hari berikutnya paska erupsi selama sekitar tujuh hari, abu vulkanik menutupi kota dan kabupaten Kediri hampir seluruhnya dan daerah yang terletak ke arah barat daya, barat, dan utara. Bahkan, kota Bandung yang berjarak 500 kilometer jauhnya dari Kediri terkena dari dampak abu vulkanik. Hampir satu bulan paska letusan tahun 2014, danau kawah yang muncul kembali. Beberapa saksi mata mengatakan bahwa letusan ini merupakan letusan yang terbesar dikarenakan jaluratusumbuutamayangtersumbat oleh kubah lava.

Belajar dari gejala-gejala yang muncul [10]–[12] sebelum letusan, pemerintah dari Indonesia telah memprioritaskan ini ke dalam rencana pembangunan nasional untuk mitigasi bencana. Pemerintah kabupaten Kediri mulai membentuk Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD). Mereka mendelegasikan pengamat gunung api Kelud untuk melakukan pengawasan menggunakan dua kamera CCTV selain seismograf. Kamera CCTV ditanam di atas dua dari tiga puncak gunung. Posisi kamera dihadapkan ke bawah langsung ke danau dan meliputi seluruh danau.

Seluruh aktivitas kawah dan sekitarnya terpantau oleh kamera CCTV. Pada saat tertentu, muncul gas baik dari bebatuan maupun dari danau itu sendiri. Gas ini adalah gas sulfur dioksida dipicu karena meningkatnya aktivitas vulkanik [5], [13]–[15]. Fluks gas [16]–[18] mulai menyebar dan berputar di sekitar danau. Akibat dari fenomena ini adalah para pengamat gunung api tidak bisa memantau kondisi danau seperti warna air danau, perubahan ketinggian air, dan sebaran gas.

Selama ini, telah banyak kegiatan penelitian yang dilakukan di gunung Kelud, seperti penelitian dengan seismik, kandungan air danau, dan kandungan gas. Akan tetapi, bidang penelitian terkait pengolahan citra kabut belum pernah dilakukan sebelumnya.

1.2 Rumusan Masalah

Pada saat proses pemantauan, suatu ketika muncul kabut atau gas yang menghalangi pandangan ke arah kawah gunung Kelud. Penyebab munculnya gas di kawah gunung Kelud ada dua. Pertama, kabut di permukaan kawah. Peningkatan aktivitas vulkanisme, menurut [5], [19] memicu gas SO_2 dan H_2S yang bereaksi dengan bebatuan untuk mempengaruhi komposisi kimia air danau kawah. Unsur belerang (S) dari gas tersebut berasal dari batuan andesit dari bawah permukaan. Kedua, kabut yang menutup puncak. Asam sulfat dan kabut vulkanik yang merupakan hasil oksidasi dari gas SO_2 yang bercampur dengan udara di atmosfer [19], [20].

Petugas vulkanologi melakukan analisis terhadap citra dari CCTV untuk mengetahui keadaan kawah dan sekitarnya. Ketika citra yang ditangkap terdapat *noise* atau kabut, maka tidak bisa dilakukan pemantauan terhadap kawah. Pada penelitian ini, kami merumuskan masalah sebagai berikut:

1. Citra dari CCTV mengandung kabut sehingga menghalangi pandangan untuk pemantauan aktivitas vulkanik pada kawah gunung Kelud. Diasumsikan bahwa citra yang mengandung kabut memiliki nilai kontras yang lebih rendah serta nilai kecerahan yang tinggi. Nilai kontras yang rendah dikarenakan perbedaan nilai intensitas tertinggi dengan intensitas terendah tidak terlalu jauh. Sedangkan kecerahan yang tinggi disebabkan oleh tinggi nilai intensitas rata-rata saluran RGB untuk tiap piksel pada area yang berkabut.

2. Kedalaman antara kawah gunung Kelud dengan kamera yang belum diketahui. Kedalaman diperlukan untuk melakukan reduksi kabut. Jika diamati pemandangan pegunungan atau pepohonan, di area yang kejauhan kita lebih sering melihat bahwa gunung atau dedaunan cenderung berkabut. Sedangkan untuk jarak yang dekat, kita bisa melihat lebih jelas warna daun tersebut [21].

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini diantaranya pertama meningkatkan visibilitas citra kawah gunung Kelud dengan reduksi kabut. Pengukuran visibilitas dilakukan dengan cara meningkatkan kontras. Tingkat kontras citra kawah gunung Kelud akan meningkat sehingga akan menjadikan warna danau kawah dan warna area sekitar kawah meningkat kontrasnya. Kedua, estimasi peta kedalaman dengan menggunakan informasi saturasi dan kecerahan. Relasi saturasi dan kecerahan dengan kedalaman digunakan untuk reduksi kabut.

1.4 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini, tentunya diperlukan adanya batasan-batasan masalah sehingga penelitian yang kami lakukan tidak keluar dari koridor yang seharusnya. Antara lain:

1. Data yang digunakan adalah citra tunggal yang dihasilkan dari rekaman kamera CCTV yang tangkap setiap 10 menit.
2. Dikarenakan penelitian ini adalah jenis perbaikan citra, maka kami mengukur nilai perubahan kontras untuk mengevaluasi bahwa citra sudah berkurang kabutnya.
3. Data yang digunakan adalah hanya citra kawah berkabut saja yang diambil antara pukul 06.00 sampai pukul 17.00.
4. Pada penelitian ini, tidak dibahas jenis volume partikel kabut.

Data citra yang kami pilih adalah citra yang mengandung kabut. Namun, ketebalan kabut tersebut tidak sampai menutup kawah secara total.

1.5 Kontribusi

Dengan penelitian ini, pengurangan kabut dengan metode berbasis *dark channel prior* diharapkan dapat:

1. Mampu mengurangi kabut pada citra kawah gunung Kelud dengan akurasi yang tinggi. Sehingga, citra kawah yang didapatkan dari kamera CCTV bisa lebih jelas.
2. Dari citra yang telah diolah, petugas bisa memantau kondisi kawah.
3. Membantu dan memudahkan Badan Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi dalam menjalankan tugasnya, terutama terkait sistem *early warning*.

Mengurangi risiko *false alarm* yang dihasilkan dari prediksi kondisi kawah yang hampir tertutup kabut.

1.6 Metodologi Penelitian

Pada bagian ini, tahapan dari penelitian ini adalah *dark channeling*, estimasi cahaya atmosfer, estimasi peta kedalaman, estimasi peta transmisi, dan yang terakhir adalah pemulihan citra. Untuk *dark channeling*, kami mengambil nilai intensitas paling rendah untuk salah satu saluran warna RGB. Proses ini dilakukan dengan cara membuat jendela blok dengan ukuran tertentu. Hasil dari *dark channeling* akan digunakan untuk estimasi cahaya atmosfer.

Estimasi cahaya atmosfer dilakukan dengan mengurutkan piksel-piksel dari *dark channel* kemudian mengurutkan berdasarkan intensitas tertinggi ke terendah. Kemudian, diambil beberapa piksel dengan intensitas tinggi untuk dihitung nilai intensitasnya untuk masing-masing saluran warna RGB.

Proses estimasi kedalaman dilakukan dengan cara mencari nilai koefisien dari persamaan linier kedalaman yang berkorelasi terhadap intensitas kecerahan dan saturasi. Untuk mencari korelasi ini, kami melakukan pengamatan terhadap citra kawah gunung Kelud pada beragam kondisi. Tiap-tiap citra kami amati nilai kecerahan dan saturasinya. Pengamatan ini kami bagi menjadi tiga tempat berdasarkan jarak kedalaman yang diperoleh secara visual. Dikarenakan pola data yang cenderung linier, maka untuk mencari nilai parameter koefisien, kami menggunakan *Least Squares Estimation* (LSE). Untuk menghitung LSE, kami

menggunakan data kedalaman model tiga dimensi kota. Setelah nilai dari kedalaman diketahui, maka proses estimasi peta transmisi bisa dilakukan.

Tahapan terakhir dari metode ini adalah pemulihan citra. Setelah melewati tahapan-tahapan sebelumnya dan peubah yang diinginkan sudah diketahui, maka pemulihan citra dari kondisi berkabut bisa dilakukan. Adapun penjelasan secara lebih rinci mengenai metodologi penelitian, maka akan kami jelaskan pada BAB 3.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

Dalam dunia visi komputer, permasalahan yang terkait dengan reduksi kabut atau *dehazing* sering disebut dengan *ill-posed problem*. Suatu permasalahan disebut sebagai *ill-posed problem* jika solusi dari permasalahan tersebut beragam atau tidak unik [22]. Metode-metode dalam pengolahan citra berkabut telah banyak dikembangkan. Diantaranya ada yang menggunakan pendekatan secara *prior* yaitu asumsi atau pengetahuan yang digunakan sebelum proses utama.

Pada bagian ini, kami melakukan kajian terhadap penelitian-penelitian terkait dengan permasalahan kabut. Kami tidak membahas secara detil teknis dari metode yang dikembangkan oleh peneliti terkait. Fokus kami pada kajian ini lebih ke arah permasalahan yang diangkat oleh para peneliti sebelumnya, metode digunakan, dan bagaimana hasil penelitian mereka.

2.1 Kajian Penelitian Terkait

Dalam beberapa tahun terakhir, sejumlah penelitian telah dikembangkan terkait pengurangan kabut. Perkembangan ini meningkat karena asumsi multidisiplin dan pendekatan. Sebuah teknik penghapusan kabut berdasarkan Analisis Komponen Independen (ICA) diusulkan oleh Fattal [23]. Dia menganggap bahwa ada ketidakkorelasi secara lokal antara *shading* permukaan dan media transmisi. Model citra kabut telah disempurnakan oleh Fattal di karyanya dengan menambahkan vektor \mathbf{R} konstan Albedo dan skalar l . Kedua peubah diganti definisi citra tanpa kabut. Albedo ini berasal dari ambiguitas dalam tiga persamaan untuk setiap piksel dalam citra masukan. Metode Fattal memperkirakan transmisi dengan menggunakan *Gauss-Markov Random Field* (GMRF). Metode ini juga memperkirakan proporsi cahaya putih yang dipantulkan oleh permukaan atau objek. Metodenya mampu memperbaiki transmisi diproyeksikan warna *airlight*. Kelemahan metode ini adalah tidak dapat menangani gambar kabut padat.

Dengan asumsi bahwa pada kontras lokal dari area yang cerah lebih tinggi dari area yang berkabut, sebuah metode berbasis *Markov Random Field*

(MRF) telah diusulkan untuk reduksi kabut dengan memaksimalkan kontras lokal [21]. Salah satu masalah bagi visibilitas dalam cuaca buruk adalah tidak adanya cahaya atmosfer. Hal ini disebabkan mendung dari langit dan cahaya atmosfer secara global bersifat konstan. Tahapan ini lebih difokuskan pada estimasi kromatisitas dari cahaya, bukan memperkirakan cahaya atmosfer. Proses ini disebut sebagai objek kromatisitas dinormalisasi. Tan menyebutkan bahwa ada beberapa pengamatan yang perlu dipertimbangkan untuk masalah *ill-posed* dalam pemandangan berkabut. Pertama, output citra pemandangan yang jelas harus memiliki kontras yang lebih tinggi dari input citra berkabut. Kedua, nilai cahaya atmosfer bervariasi yang tergantung pada kedalaman citra. Sehingga, pada blok jendela tertentu, cahaya atmosfer cenderung memiliki kedalaman yang sama. Ketiga, pada citra luar ruangan, cuaca buruk biasanya mengganggu citra kabut. Dengan demikian, citra hasil reduksi kabut harus memiliki fitur yang juga dimiliki oleh citra dalam kondisi jelas. Metode ini menghasilkan gambar yang cukup jelas memiliki kontras kurang tetapi rentan terhadap saturasi yang berlebih. Hal ini terjadi karena tingkat perbedaan kontras yang tinggi antara jendela blok yang berdekatan dan mungkin berisi blok jendela artifak pada jarak pendek. Hal ini menyebabkan hasil untuk terlihat tidak alami.

Dengan asumsi dari pengamatan, di sebagian besar jendela blok dari pemandangan alam kecuali area langit, setidaknya ada satu saluran warna dalam ruang RGB, memiliki intensitas rendah dan hampir mendekati ke nol. Sebagai contoh, ketika kita mengamati objek pemandangan seperti daun pohon, bunga biru, atap merah, dan sebagainya di ruang warna RGB, untuk dedaunan pohon mereka memiliki saluran warna hijau tertinggi dibandingkan dengan sisa dua saluran warna lainnya. Untuk bunga biru, saluran biru cenderung menjadi saluran warna dengan intensitas tertinggi ketika dua lainnya rendah. Dan jelas untuk atap merah, saluran merah cenderung tinggi. Ini disebut dengan *dark channel prior* (DCP) yang diperkenalkan oleh He [24]. Dengan menggunakan asumsi ini, jendela blok dengan daerah gelap jelas dianggap bukan sebagai sumber cahaya. Hasil DCP dapat menangani kabut padat. Kelemahan dari metode ini gagal ketika ada daerah dengan warna cerah seperti langit, warna danau yang mencerminkan sinar matahari, dan benda putih. Masalah lain dari metode ini adalah bahwa hasil

peta transmisi mengandung efek halo di sekitar tepi objek. gambar dipulihkan menj yang disebabkan oleh gagalnya estimasi sumber cahaya. Citra yang dihasilkan menjadijendela-jendela kecil yang berbentuk blok. Untuk mengatasi masalah ini, blok tersebut diperhalus dengan menggunakan algoritma *soft matting* untuk peningkatan kualitas citra keluaran. Tapi, kelemahan dari penyaringan ini terlalu lama. dua tahun berikutnya, He *et al*[25] mengusulkan penyaringan dengan menggunakan citra pedoman untuk meningkatkan waktu *matting*. Metode DCP dapat mengakibatkan oversaturation jika ada ada benda terang dari cahaya atmosfer.

Sebuah metode baru dari Meng *et al*[26], yang diturunkan dari DCP dalam hal kendala batas (*boundary constraint*), yang mana batasan ini membatasi cahaya pemandangan, menggunakan fungsi transmisi untuk mengembalikan citra kabut dengan pembobotan berdasarkan bentuk L1. Meng memperkenalkan geometri baru dalam model citra kabut dengan penambahan C_0 dan C_1 sebagai batas kendala bawah dan batas atas secara urut. Pembobotan berasal dari asumsi bahwa dalam piksel blok jendela lokal yang berdekatan cenderung memiliki kedalaman yang sama. Meng mengklaim bahwa, dalam kasusnya, bentuk L1 yang lebih kuat dari bentuk L2. Tapi, metode ini bisa gagal untuk meminimalkan efek halo.

Dalam kebutuhan lanjut, tidak hanya reduksi kabut sangat penting dalam jangka restorasi visibilitas tetapi juga warna restorasi video. Sebuah algoritma berbasis video untuk dehazing diusulkan oleh Kim *et al*[27]. Umumnya, cahaya atmosfer diasumsikan warna sebagai area dengan tingkat kecerahan yang tinggi [23], [26], [28]. Zhu *et al* memperkirakan cahaya atmosfer dengan memilih atas 0,1% dalam domainnya saluran gelap sebagaimana yang dilakukan oleh He *et al*[21], [24]. Zeng dan Dai [29] memilih intensitas maksimum dari masing-masing warna pada saluran RGB. Sedangkan dalam metode Kim *et al*, cahaya atmosfer diperkirakan dengan *quad-tree subdivision*. Citra dibagi menjadi empat blok berbentuk persegi panjang. Kemudian, masing-masing citra dibagi lagi secara rekursif sampai mencapai batas tertentu. Tapi, dalam cahaya atmosfer, metode Kim bisa gagal di area langit. Untuk melakukan estimasi peta transmisi, Kim

digunakan metode yang dioptimalkan dengan meminimalkan *mean-squared error* (MSE) dari fungsi *cost* kontras dan fungsi *cost* untuk informasi yang hilang.

Diantara permasalahan metode reduksi kabut terletak pada kompleksitas perhitungan. Gao et al[30] mengenalkan metode *dehazing* dengan konsep koreksi negatif. Konsep ini terinspirasi dari penerapan fotografi. Berdasarkan pengamatan dari pengembangan fotografi, kontras dan saturasi dari citra bisa ditingkatkan dengan cara melakukan perbaikan dengan terhadap citra negatifnya. Pada penelitian Gao, estimasi peta transmisi tidak dilakukan. Sebagai gantinya adalah melakukan estimasi terhadap faktor koreksi pada citra negatif. Faktor koreksi ini merupakan bentuk logaritmik dari transformasi gamma. Pada konsep ini, citra berkabut cenderung memiliki kontras yang rendah. Kecerahan pada citra negatif ditingkatkan untuk membuat titik tergelap pada citra asli mencapai nilai rendah dengan cara melakukan transformasi gamma, logaritmik, dan linier. Dari transformasi linier, kontras dari citra asli mengalami kenaikan. Semakin tinggi nilai kecerahan dari citra asli, maka semakin rendah pula nilai kecerahan dari citra negatif. Sebagai hasilnya, metode ini bisa menaikkan nilai saturasi dari citra asli. Namun, kekurangan dari metode ini tidak bisa mengurangi kabut yang tebal.

Zhu et al[21] mengusulkan model berdasarkan pengamatan kedalaman yang berkorelasi dengan kecerahan dan saturasi. Diasumsikan bahwa dalam citra berkabut di alam, jarak antara kamera dengan objek cukup jauh. Ini menunjukkan bahwa kedalaman pemandangan memiliki batas tertentu. Secara singkat, metode yang diajukan oleh Zhu et al ini sangat bergantung dengan pemulihan peta kedalaman. Mereka mengamati di tempat kejadian alam yang memisahkan secara jelas antara dekat objek dan objek jauh dalam latar kabut. Pengamatan ini mengakibatkan bahwa dalam dekat obyek, di mana latar yang tak terpengaruh oleh kabut, nilai saturasi secara statistik meningkat. Ketika pada jarak menengah, di mana kabut sedikit mempengaruhi, nilai saturasi yang semakin rendah ketika nilai kecerahan mulai meningkat. Dan untuk latar yang jauh, di mana kabut hampir sepenuhnya diambil alih latar, intensitas saturasi secara statistik menurun dan intensitas kecerahan secara drastis meningkat. Bagian yang paling menarik dari pengamatan ini bahwa saturasi dan kecerahan yang berkorelasi dengan jarak latar. Ketika kabut semakin padat, semakin besar perbedaan antara saturasi dan

kecerahan. Dari statistik inilah dikatakan bahwa adanya korelasi positif antara kedalaman latar, konsentrasi kabut, dan kecerahan dikurangi oleh saturasi terkait. Inilah yang melatarbelakangi istilah *color attenuation prior* (CAP) berasal. Dalam model kedalaman linear, ada beberapa koefisien yang harus dioptimalkan menggunakan metode pengawasan. CAP ini cukup cepat dan mampu menjaga tepi warna dibandingkan dengan metode lain. Banyak karya yang baru-baru ini populer diturunkan berdasarkan pada DCP, yang menyatakan bahwa gambar yang jelas, secara lokal memiliki intensitas rendah dalam satu atau dua channel warna. Beberapa penelitian adaptif telah digunakan dalam [24], [31]. Dan terbaru didasarkan pada mesin belajar [21], [32]. Kunci untuk dehazing adalah untuk memperkirakan peta transmisi [21], [32].

2.2 Model Citra Kabut

Pada bagian ini, peneliti menjelaskan tentang dasar-dasar teori yang digunakan. Istilah-istilah asing dalam penelitian ini akan dijelaskan secara lebih terperinci. Adapun teori dasar yang akan dibahas adalah model citra kabut, pelemahan langsung, *airlight*, *dark channel*, cahaya atmosfer, peta transmisi, peta kedalaman, saturasi, dan kecerahan.

Citra berkabut adalah citra yang ditangkap oleh kamera berupa pemandangan, bangunan atau objek apapun yang terdapat di sekitarnya kabut atau embun. Secara singkat, penyebab citra berkabut adalah warna dari objek asli yang melewati medium berkabut mengalami *scattering* atau penyebaran. Kabut atau *haze*, menurut [33], cenderung menghasilkan warna abu-abu. Perubahan warna inilah yang disebut dengan pelemahan warna.

Cahaya yang melewati media hamburan mengalami pelemahan sepanjang jalur aslinya dan didistribusikan ke arah lain. Proses ini umumnya dimodelkan secara matematis dengan mengasumsikan bahwa sepanjang jarak pendek terdapat hubungan linier antara pecahan cahaya yang diblokkan dan jarak yang ditempuh [23]. Secara lebih formal, sepanjang jarak yang sangat pendek d , pecahan cahaya yang diserap diberikan oleh β dimana β adalah koefisien medium karena hamburan cahaya.

Dengan asumsi bahwa cahaya tambahan ini didominasi oleh cahaya yang mengalami berbagai kondisi hamburan, memungkinkan kita untuk memperkirakan cahaya yang masuk sebagai isotropik dan seragam di luar angkasa. Dengan kata lain, hamburan cahaya yang melalui medium tersebar ke semua arah dengan besaran yang sama. Hamburan cahaya yang konstan ini, yang dikenal sebagai *airlight*, dapat digunakan untuk mendekati istilah hamburan sebenarnya dalam persamaan propagasi dari radiasi untuk mencapai model pembentukan citra sederhana berikut ini. Model matematis dari citra kabut menurut [33]–[35] adalah:

$$\mathbf{I}(\mathbf{x}) = \mathbf{J}(\mathbf{x})t(x) + (1 - t(x))\mathbf{A}, \quad (2.1)$$

Contoh citra daribisa dilihat pada Gambar 2.1. adapun penjelasan terkait masing-masing peubah pada persamaan (2.1) adalah sebagai berikut:

1. \mathbf{x} adalah (x, y) vektor 2D yang merepresentasikan koordinat piksel (x, y) citra.
2. Sedangkan \mathbf{I} merepresentasikan dari citra berkabut. $\mathbf{I}(\mathbf{x})$ adalah vektor 3D warna RGB.
3. *Scene Radiance* atau cahaya latar citra direpresentasikan sebagai \mathbf{J} . $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ adalah vektor 3D saluran RGB yang dipantulkan oleh latar pada titik \mathbf{x} . Bisa juga dikatakan bahwa \mathbf{J} adalah citra yang bebas kabut.
4. t disebut sebagai peta transmisi atau transparansi dari kabut. $t(x)$ ini sifatnya skalar dengan besaran antara 0 dan 1. Maknanya adalah jika nilai $t(x)$ ini sama dengan nol (0), maka dengan kondisi ini disebut sebagai kondisi yang berkabut total. Sedangkan jika nilai $t(x) = 1$, maknanya adalah citra tersebut benar-benar bersih dari kabut. Dan tentunya, jika $0 < t(x) < 1$ maka disebut semi-transparan.
5. Selanjutnya adalah \mathbf{A} yang disebut sebagai cahaya atmosfer. \mathbf{A} ini adalah vektor 3D saluran RGB. Cahaya atmosfer ini secara spasial cenderung konstan. Dan ini sering juga disebut sebagai warna dari atmosfer, horizon, atau langit [33]–[35].



Gambar 2.1. Model citra berkabut beserta nama peubah. Di mana **I** adalah citra berkabut, **A** adalah cahaya atmosfer, **J** adalah citra yang dipulihkan, dan **t** adalah peta transmisi.

di mana **A** adalah vektor yang diasumsikan sebagai cahaya atmosfer terletak pada bagian atas citra **I**. Pada citra **t**, warna hitam mengindikasikan bahwa nilai **t** mendekati nol (0) dan sebaliknya.

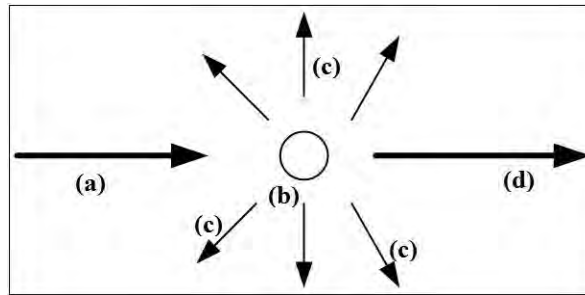
2.3 Hamburan

Hamburan atau *scattering* adalah fenomena dimana partikel-partikel di atmosfer menghamburkan cahaya. Hamburan bisa juga berarti partikel menyerap sejumlah kecil cahaya masuk dan kemudian memantulkan cahaya sehingga seolah-olah berfungsi sebagai sumber cahaya [36]. Untuk lebih jelasnya, fenomena hamburan bisa dilihat pada Gambar 2.2.

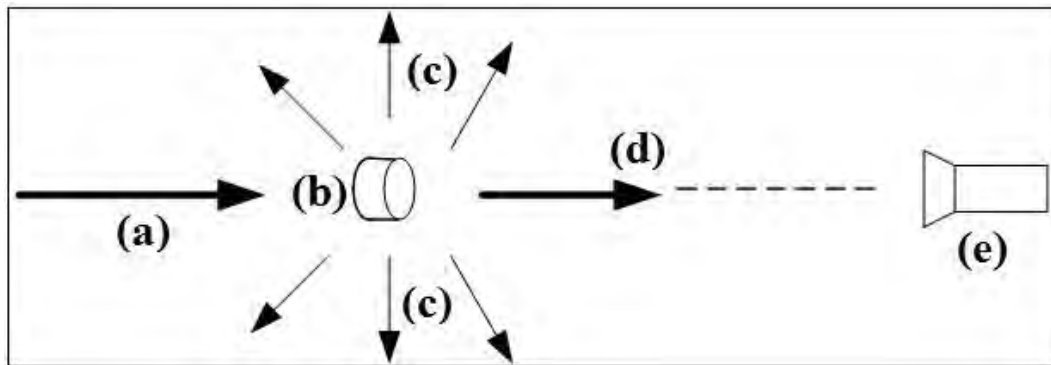
Pertimbangkan volume kecil di atmosfer sebagaimana digambarkan pada Gambar 2.3. Berdasarkan [33], [37], nilai total dari flux cahaya Φ , yang dihamburkan oleh volume kecil dari atmosfer, proporsional dengan besarnya flux cahaya masuk E :

$$\Phi(\lambda) = \beta(\lambda)E(\lambda)\Delta V, \quad (2.2)$$

dimana, E adalah intensitas dari cahaya masuk, Φ adalah total dari flux cahaya yang dihamburkan, ΔV adalah volume, β adalah koefisien dari hamburan, dan λ adalah panjang gelombang dari cahaya.



Gambar 2.2. Gambaran dari partikel yang menghamburkan cahaya. (a) adalah cahaya masuk atau *incident light*, (b) adalah partikel di atmosfer, (c) adalah cahaya yang dihamburkan, dan (d) adalah cahaya yang tidak mengalami hamburan.

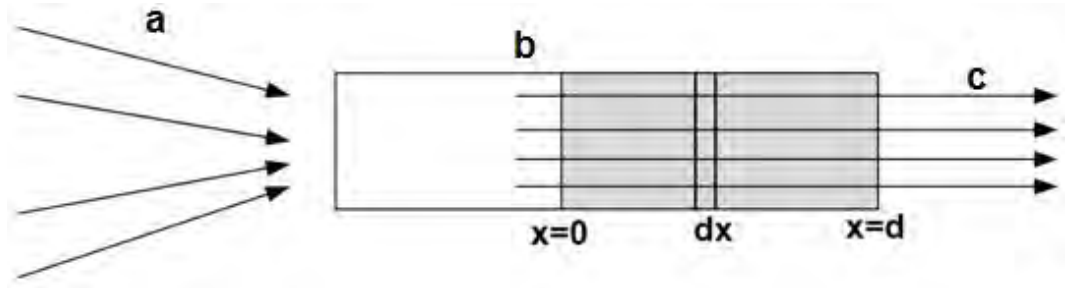


Gambar 2.3. Model dari hamburan volume kecil dari atmosfer. (a) adalah cahaya masuk, (b) adalah volume kecil dari partikel, (c) adalah flux cahaya yang dihamburkan Φ , (d) adalah cahaya yang tidak dihamburkan, dan (e) adalah kamera.

Nilai dari koefisien $\beta(\lambda)$ ditentukan oleh material, ukuran, bentuk, dan kepadatan dari partikel. Hamburan adalah penyebab utama dari pelemahan langsung (*direct attenuation*) dan *airlight* [24].

2.4 Pelemahan Langsung

Seberkas cahaya yang mengalami hamburan, akan menimbulkan efek samping bagi cahaya masuk atau *incident light*. Efek yang pertama dari hamburan ini adalah terjadinya pelemahan langsung atau *direct attenuation*. Proses ini menyebabkan pancaran titik objek sampai ke pengamat seiring dengan meningkatnya kedalaman latar. Di sini, turunan dari model pelemahan yang diberikan oleh [37] dirangkum.



Gambar 2.4. Proses terjadinya *collimated beam*. **a** berkas cahaya yang masuk menuju partikel, **b** partikel di atmosfer, **c** cahaya yang keluar dari partikel, dx ketebalan dari partikel

Pertimbangkan ada seberkas balok kilat cahaya atau *collimated beam* yang terjadi pada medium atmosfer (sebagai contoh proses ini terjadi pada satu piksel). *Collimated beam* artinya bahwa cahaya yang melewati partikel di atmosfer disebarkan secara paralel sebagaimana terlihat pada Gambar 2.4. Sinar diasumsikan memiliki luas penampang satuan. Perhatikan cahaya yang melewati lembaran kecil yang disebut sebagai lamina dengan ketebalan dx [33]. Besarnya pemancaran pada lokasi x bisa dituliskan dengan:

$$dE(x, \lambda) = -\beta(\lambda)E(x, \lambda)dx, \quad (2.3)$$

di mana volume ΔV menjadi $1dx$. Tanda "-" bermakna bahwa cahaya mengalami pelemahan. Dengan mengintegrasikan kedua sisi dari persamaan (2.3) dengan batasan $x = 0$ dan $x = d$, maka dihasilkan:

$$E(d, \lambda) = E_0(\lambda)e^{-\int_0^d \beta(\lambda)d}, \quad (2.4)$$

di mana $E_0(\lambda)$ adalah besarnya pemancaran pada titik ketika $x = 0$. Kadang, proses pelemahan karena hamburan dituliskan dengan istilah ketebalan optik, $T = \beta(\lambda)d$ (model ini lebih dikenal dengan hukum Bouguer atau hukum Beer-Lambert untuk pelemahan cahaya yang melalui partikel tertentu [38]).

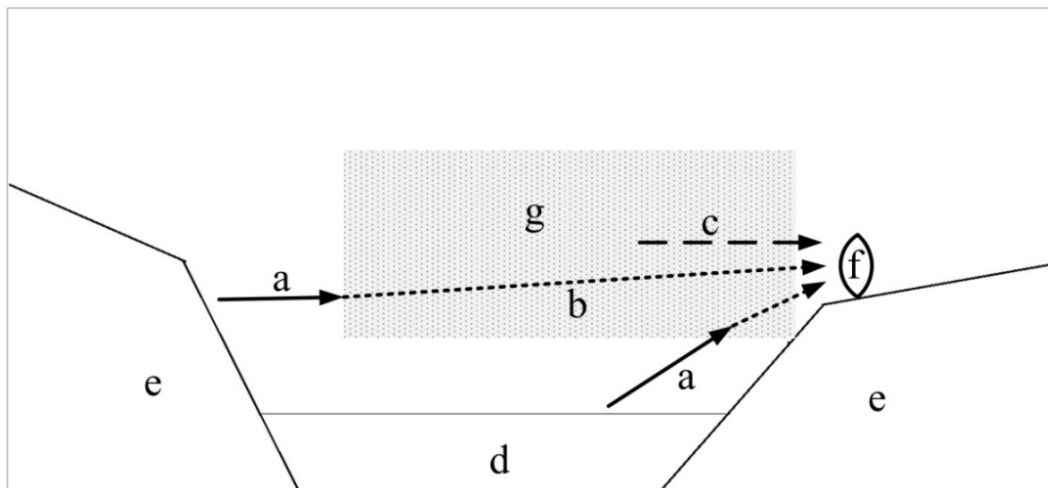
Model fisik dari citra kabut kawah gunung Kelud adalah sebagaimana terlihat pada Gambar 2.5. Kabut terbentuk dari partikel-partikel uap air di atmosfer menyerap dan menyebarkan cahaya. Istilah persamaan $\mathbf{J}(x)t(x)$ disebut sebagai pelemahan langsung. Pada kondisi tertentu, cahaya yang datang kemudian dipantulkan oleh objek sebagiannya diserap oleh partikel di atmosfer dan sisanya

diredam. Transmisi t adalah sebuah rasio antara perbandingan intensitas cahaya yang tidak mengalami pelemahan dan mencapai titik pengawas dengan intensitas cahaya yang dipantulkan oleh objek.

2.5 Airlight

Efek kedua dari yang ditimbulkan dari hamburan adalah *airlight*. Istilah kedua dari persamaan (2.1) yaitu $A(1 - t(x))$ disebut sebagai *airlight*[23], [39], [40]. Jika kita mengamati kumpulan awan atau kabut di langit yang dekat dengan sumber cahaya, kita melihat kabut tersebut berfungsi seolah-olah memancarkan cahaya. Hal ini terjadi karena partikel di atmosfer menyebarkan cahaya yang diserap.

Pada penelitian ini, kami tidak membedakan apakah itu kabut tebal, kabut sedang, kabut tipis, atau debu yang semua ini disebabkan oleh partikel di atmosfer. Secara rinci, perbedaan ini bisa dilihat pada Tabel 2.1. Yang lebih penting dari ini adalah bahwa bentuk fisik partikel tersebut tidaklah terlalu berpengaruh dalam pencitraan. Model citra kabut pada persamaan (2.1) valid untuk kasus semacam ini.



Gambar 2.5. Model fisik dari citra berkabut di gunung Kelud. Di mana **a** adalah cahaya pantulan dari objek latar, **b** adalah pelemahan langsung, **c** adalah *airlight*, **d** adalah air danau kawah, **e** adalah daratan tepi danau, **f** adalah kamera pemantau, dan **g** adalah kabut yang berada di atas kawah.

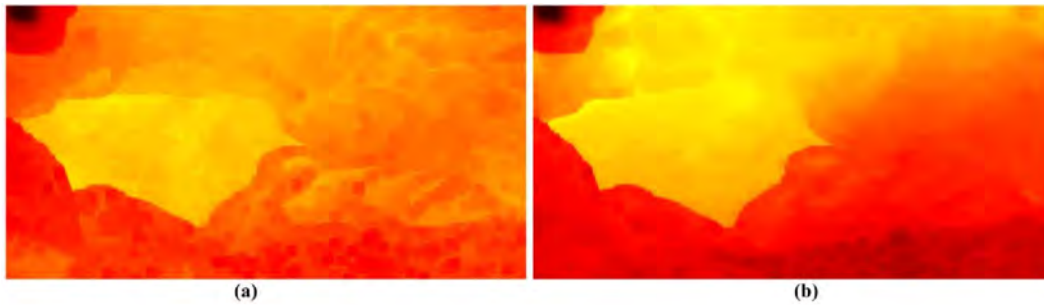
Tabel 2.1 Ukuran partikel dalam beragam kondisi [33], [37]

Kondisi	Tipe Partikel	Radius (μm)	Konsentrasi (cm^{-3})
Udara	Molekul	10^{-4}	10^{19}
Kabut	Aerosol	10^{-2} -1	10^3 -10
Asap (<i>Fog</i>)	Tetes air	1-10	100-10
Awan	Tetes air	1-10	300-10
Air Hujan	Tetes air	10^2 - 10^4	10^{-2} - 10^{-5}

2.6 Dark Channel

Istilah *dark channel* atau saluran gelap pertama kali dikenalkan oleh He [24] pada tahun 2011. Dia mengasumsikan bahwa untuk area selain langit ada beberapa piksel dimana salah satu saluran warna RGB memiliki intensitas rendah. Piksel-piksel dengan kondisi ini memiliki sifat memunculkan warna asli. Jika diambil sampel secara acak terhadap citra latar pemandangan, akan banyak ditemukan objek warna-warni seperti: persawahan dan pepohonan dengan warna hijau, rumah penduduk dengan atapnya yang berwarna coklat, dan jalan raya yang berwarna abu-abu gelap. Secara statistik, nilai intensitas salah satu saluran warna RGB pada piksel objek-objek tersebut, akan memiliki kecenderungan rendah dan bahkan mendekati nol (0). Terlihat pada Gambar 2.6 bahwa intensitas tinggi didominasi oleh kawah dan kabut.

Piksel-piksel dengan intensitas rendah dari salah satu saluran warna RGB disebut sebagai piksel gelap. Ada beberapa faktor yang menyebabkan munculnya piksel gelap ini. Pertama, piksel gelap yang disebabkan oleh objek berwarna sebagaimana yang terlihat pada Gambar 2.7. Dalam pemandangan di dunia nyata, objek-objek berwarna yang memiliki efek pemantulan cahaya rendah, cenderung menghasilkan warna piksel gelap. Jika diamati saluran warna RGB suatu objek, sebagai contoh daun yang berwarna hijau, maka saluran warna hijau dari daun tersebut akan cenderung tinggi dan dua saluran lainnya akan cenderung sangat rendah. Contoh lainnya bunga dengan warna kuning, maka saluran merah dan hijau akan cenderung tinggi dan saluran biru akan cenderung rendah [24], [29], [41], [42].



Gambar 2.6. *Dark channel* dari kondisi kawah gunung api Kelud. (a) adalah citra *dark channel* dengan kondisi kabut sedikit. (b) adalah citra *dark channel* dengan kabut agak tebal.



Gambar 2.7. Contoh citra dengan latar beragam warna. (a) adalah citra dengan latar tanaman dan bunga beragam warna, (b) adalah pepohonan dengan beragam warna daun, dan (c) adalah citra reog dengan beragam warna motif kostum.

Suasana di luar biasanya banyak terdiri dari beragam warna, seperti: gedung, mobil, bunga, pepohonan, daun, orang, dan rambu-rambu sebagaimana yang nampak pada Gambar 2.7. Keberagaman warna objek inilah yang bisa menimbulkan piksel gelap. Yang perlu digarisbawahi dari definisi piksel gelap adalah bahwa nilai intensitas piksel gelap tidak harus mutlak dari keseluruhan nilai totalnya. Artinya, jika ada satu saluran piksel sudah memiliki nilai intensitas yang sangat rendah, hal ini sudah bisa disebut sebagai piksel gelap. Tidak perlu dalam suatu piksel ketiga saluran warnanya memiliki intensitas yang rendah. Jadi, akan memungkinkan bila ada suatu salah satu saluran hijau cerah, namun, kedua saluran sisanya berintensitas rendah. Hal ini sudah cukup menjadikan piksel tersebut sebagai piksel gelap.

Kedua, piksel gelap disebabkan adanya efek bayangan dari objek itu sendiri atau objek yang lain sebagaimana yang nampak pada Gambar 2.8. Selain keberagaman warna, objek-objek di luar juga terdiri atas bayangan. Bayangan dari

suatu objek ditimbulkan karena cahaya dari sumber cahaya yang terhalang oleh bagian lain dari objek itu sendiri atau objek lain.



Gambar 2.8. Citra objek dengan bayangannya. (a) adalah citra bangunan dengan bayangan, (b) adalah citra pepohonan beserta bayangannya, dan (c) adalah citra kendaraan umum dengan bayangannya.



Gambar 2.9. Citra dengan objek gelap. (a) adalah citra candi Prambanan dan (b) adalah citra mobil.

Ketiga, piksel gelap yang berasal dari objek gelap. Contoh dari objek gelap adalah seperti: roda sepeda, roda mobil, warna aspal jalan raya, rambut manusia, dan tembok yang berwarna hitam. Gambar 2.8 menunjukkan salah satu penyebab munculnya *dark channel*, yaitu bayangan. Warna batu dari citra candi Prambanan pada Gambar 2.9.(a) dan warna mobil hitam pada Gambar 2.9 (b) menjadi contoh penyebab *dark channel*.

2.7 Cahaya Atmosfer

Sebagian besar cahaya yang masuk ke mata tidaklah secara langsung berasal dari sumber cahaya itu sendiri melainkan berasal dari proses hamburan. Proses ini juga merupakan efek dari proses pergerakan atau propagasi cahaya dari sumber asal melalui atmosfer bumi. Dalam proses propagasi, tentunya cahaya akan baik melewati beragam partikel diantaranya adalah aerosol dan awan [43],

[44], maupun mengenai suatu objek. Cahaya akan melewati aerosol maupun awan, akan dihamburkan oleh partikel tersebut.

Sebagaimana yang sering kita lihat di atmosfer, kita bisa melihat beragam warna yang ditimbulkan dari proses hamburan ini terhadap molekul dan partikel di udara. Fenomena ini akan menimbulkan beragam efek visual yang kompleks [33]. Hal ini dikarenakan bahwa proses hamburan ini bisa menjadi gangguan bagi pemantau.

Secara alami, cahaya atmosfer atau yang biasa disebut dengan *ambient light* [24], [45] berfungsi sebagai sumber cahaya pada suatu latar. Sedangkan pada citra, cahaya atmosfer diasumsikan sebagai area yang paling buram [24]. Merujuk kembali pada persamaan (2.1), nilai dari cahaya atmosfer disimbolkan dengan **A**. Nilai intensitas dari **A** ini diperoleh dari citra *dark channel* dengan mencari intensitas 0.1% tertinggi. Dari Gambar 2.10, kita bisa melihat lebih jelas area yang disebut sebagai cahaya atmosfer.

Sekilas, definisi dari *airlight* dan cahaya atmosfer cenderung memiliki kemiripan. Perbedaan yang paling mendasar dari kedua istilah ini adalah bahwa cahaya atmosfer merupakan sumber cahaya itu sendiri. Sedangkan *airlight* adalah proses pelemahan oleh kabut atau partikel air di udara terhadap objek dari suatu latar citra. Sehingga, efek dari proses *airlight* ini kadang kala atmosfer bisa berfungsi sebagai sumber cahaya [33]. Sangat mungkin terjadi bahwa latar dari citra akan memiliki banyak objek yang berfungsi seolah-olah sebagai sumber cahaya.



Gambar 2.10. Cahaya atmosfer dari citra berkabut. (a) adalah cahaya atmosfer dari pemandangan berkabut jalan desa. (b) adalah cahaya atmosfer dari pemandangan berkabut dari area pepohonan. Warna merah pada Gambar

2.10(a) dan Gambar 2.10(b) mewakili area yang diasumsikan sebagai sumber cahaya.

2.8 Peta Transmisi

Peta transmisi atau *transmission map* bisa dikatakan sebagai tingkat transparansi dari suatu citra [24]. Sedangkan menurut [23], [30], [40], peta transmisi disebut sebagai sebagian porsi cahaya yang telah melewati jalur propagasi antara pemantau dengan suatu titik permukaan objek latar. Peta transmisi disimbolkan dengan peubah skalar t yang bernilai antara $[0,1]$. Bisa juga dikatakan bahwa peta transmisi adalah invers dari peta kedalaman [45].

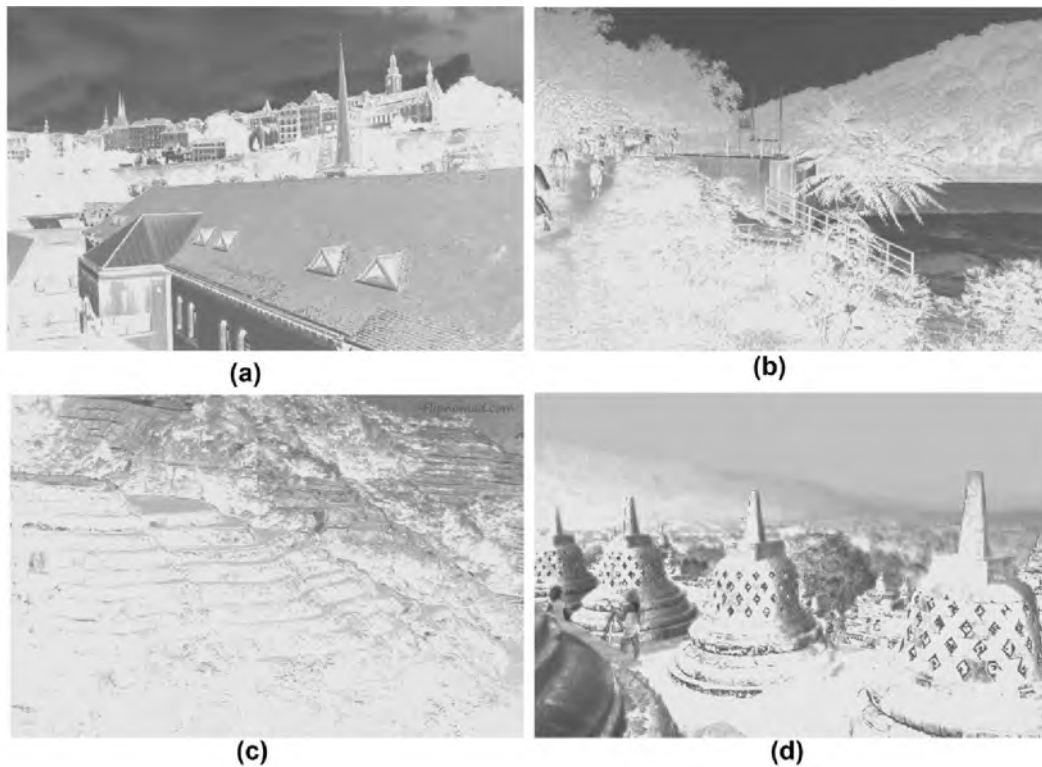
Pada kondisi tertentu, sebagai contoh saat turun kabut tebal, proses hamburan pada satu partikel kabut tidak akan berulang pada partikel yang sama [33]. Jika proses ini terus terjadi, maka akan terjadi proses hamburan yang banyak. Inilah yang menyebabkan citra pada latar mengalami kekaburan.

Proses hamburan yang terjadi dari objek latar, kemudian melewati partikel kabut dengan kondisi β yang beragam, lalu mencapai titik pengamat dengan bisa dirumuskan dengan:

$$t(x) = \exp\left(-\int_0^{d(x)} \beta(z)dz\right), \quad (2.5)$$

dimana β adalah koefisien hamburan cahaya dan d adalah peta kedalaman. Peubah t disebut sebagai transmisi yang menggambarkan sebagian porsi cahaya yang dihamburkan dan melewati partikel-partikel di udara kemudian sampai ke mata pengamat.

Saat kondisi cuaca yang cerah [46] nilai dari β cenderung mendekat nol (0) sehingga $\mathbf{I} = \mathbf{J}$. Namun, dalam kondisi berkabut nilai β tidak bisa diabaikan. Dalam keadaan atmosfer yang homogen [24], [33], [42], nilai dari β cenderung konstan. Suatu kondisi atmosfer dikatakan konstan jika kepadatan dari atmosfer tersebut konstan terhadap ketinggian. Nilai β ini juga bermakna besarnya volume hamburan dari suatu panjang gelombang yang bergerak ke semua arah [33].



Gambar 2.11. Contoh peta transmisi dari beragam citra. (a) Peta transmisi dari rumah dan bangunan lain, (b) Peta transmisi dari citra tepi danau, (c) Peta transmisi dari citra dengan latar sawah terasiring, (d) Peta transmisi dari candi Borobudur.

Beragam citra transmisi bisa dilihat pada Gambar 2.11. Semakin gelap atau semakin rendah intensitas pada citra peta transmisi, maka semakin jauh jarak dari objek. Dan sebaliknya, semakin tinggi intensitas maka semakin dekat jarak objek terhadap pengamat.

Mata manusia pada dasarnya dengan mudah bisa membedakan jarak objek pada suatu citra. Ada pohon yang letaknya jauh dan ada pula yang dekat. Jika menggunakan model kamera stereo, citra yang dihasilkan dari kamera ini ada dua yaitu citra kamera kiri dan kanan. Koordinat sumbu y dari citra kiri dan kanan memiliki kesamaan dikarenakan sifat kamera stereo memiliki koordinat sumbu y yang sama. Dengan mengambil satu titik objek dari citra kiri kemudian dibandingkan dengan titik objek dengan citra kanan maka akan terjadi selisih pada koordinat x . Selisih jarak antara sumbu x pada citra kiri dan kanan inilah yang dinamakan dengan *disparity* [47], [48]. Keterkaitan antara kedalaman dengan *disparity* berada pada proporsionalitas yang ada pada keduanya. Proporsionalitas

ini dilihat dari perbandingan lurus antara kedalaman dengan *focal length* dan jarak *baseline* serta perbandingan terbalik dengan *disparity*.

Berdasarkan konsep visi komputer, kedalaman dari citra mewakili suatu nilai intensitas yang berkorelasi dengan jarak. Masing-masing piksel dari citra kedalaman menyimpan informasi jarak suatu objek. Jika dibuat pengandaian bahwa pada satu titik dari suatu citra berada pada posisi x maka titik pada posisi x tersebut memiliki jarak dengan kamera pengamat. Selanjutnya, jarak ini disimbolkan dengan d .

Proses pengukuran kedalaman dari suatu citra sangat menantang [21], [24]. Jika di dalam ruangan, kita bisa menggunakan bantuan dengan alat seperti kamera stereo dan Kinect. Namun, untuk kondisi di luar ruangan, di mana jarak antara kamera pengamat dengan objek latar variasinya tinggi, sangat sulit dilakukan proses pengukuran kedalaman secara akurat. Oleh karena itu, untuk mengetahui kedalaman dari suatu citra luar ruangan diperlukan asumsi dan estimasi yang kuat.

Peta kedalaman dan peta transmisi memiliki korelasi secara negatif. Semakin besar nilai dari kedalaman, maka nilai intensitas peta transmisi akan semakin menurun dan sebaliknya. Dikarenakan sifat β yang cenderung konstan pada atmosfer yang homogen, maka model kedalaman dari citra luar ruangan adalah:

$$d(x) = -\ln \frac{t(x)}{\beta}, \quad (2.6)$$

Sayangnya, asumsi dari sifat konstan β tidak berfungsi jika kondisi atmosfer tidak homogen, contohnya ketika adanya kabut, sehingga persamaan (2.6) tidak bisa dipakai untuk estimasi kedalaman [24].

2.9 Degradasi Citra

Kabut pada citra menyebabkan kualitas visibilitas dari citra itu sendiri berkurang. Visibilitas bisa dikatakan sebagai pengukuran bagaimana suatu objek bisa dilihat [24], [35]. Efek dari berkurangnya tingkat visibilitas akan menurunkan akurasi untuk proses deteksi dan pengenalan objek, mengaburkan warna asli dari suatu objek, dan sebagainya.

Proses degradasi citra yang pertama disebabkan karena adanya pelemahan langsung. Dalam visi komputer, visibilitas biasanya diukur dengan gradien dari citra. Jika diambil dari persamaan (2.1), degradasi yang pertama adalah:

$$\nabla \mathbf{I}(x) = t(x) \nabla \mathbf{J}(x), \quad (2.7)$$

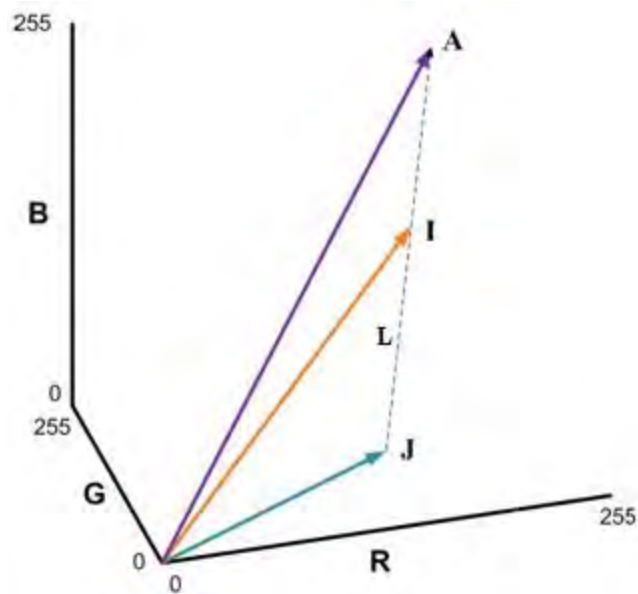
jika t seragam maka nilai gradien t diabaikan. Dimana nilai $0 < t < 1$ maka besaran $\nabla \mathbf{J}$ lebih kecil dari $\nabla \mathbf{I}$. Dari keadaan ini maka berkurangnya visibilitas disebabkan adanya pelemahan langsung $\mathbf{J}(x)t(x)$.

Sedangkan proses degradasi yang kedua disebabkan adanya perubahan keragaman warna oleh *airlight*. Dikarenakan tambahan *airlight*, maka $\mathbf{J}(x)$ dan $\mathbf{I}(x)$ tidak berada pada arah yang sama sebagaimana yang terlihat pada Gambar 2.12. Ketiga kombinasi peubah pada Gambar 2.12 berada dalam ruang warna RGB.

Perubahan arah vektor inilah yang menyebabkan terjadinya perubahan keragaman warna. Apabila dituliskan secara singkat, visibilitas citra berkurang disebabkan karena adanya perkalian pelemahan langsung dan perubahan keragaman warna disebabkan oleh penjumlahan *airlight*.

Secara geometri, model kabut persamaan (2.1) berarti bahwa dalam ruang warna RGB, vektor \mathbf{A} , $\mathbf{I}(x)$, dan $\mathbf{J}(x)$ bersifat coplanar. Selain itu, titik akhir dari \mathbf{A} , \mathbf{I} , dan \mathbf{J} juga kolinier sepanjang garis \mathbf{L} pada Gambar 2.12. Transmisi t bisa dikatakan juga sebagai rasio dari dua segmen garis:

$$t(x) = \frac{\|\mathbf{A} - \mathbf{I}(x)\|}{\|\mathbf{A} - \mathbf{J}(x)\|} = \frac{A_c - I_c(x)}{A_c - J_c(x)} \quad (2.8)$$



Gambar 2.12. Vektor warna **I** adalah kombinasi linier dari **J** dan **A**. Di mana **R**, **G**, dan **B** adalah saluran warna merah, hijau, dan biru. Sedangkan **I** adalah citra berkabut, **A** adalah cahaya atmosfer, **L** adalah garis yang menghubungkan titik-titik, dan **J** adalah citra tanpa kabut.

2.10 Kecerahan

Kecerahan atau *brightness* adalah persepsi secara visual di mana objek seolah-olah memancarkan atau memantulkan cahaya. Dalam ruang warna RGB, kecerahan bisa juga didefinisikan sebagai rata-rata μ dari saluran warna merah, hijau, dan biru. Kecerahan juga bisa dikatakan sebagai saluran warna *value* dari ruang warna HSV.

2.11 Saturasi

Saturasi atau kejenuhan dari warna didefinisikan sebagai intensitas warna dari suatu citra. Setidaknya minimal ada satu saluran warna dan maksimal dua saluran warna yang dijadikan ukuran saturasi. Pengukuran saturasi bertujuan untuk mengukur seberapa besar nilai kemurnian suatu warna atau *true/pure color*. Rentang nilai pengukuran ini terletak pada 0 hingga 100 % dimana jika nilai mencapai 100 %, maka kondisi intensitas warna asli berada saat paling tinggi.

2.12 Kontras

Kontras bisa dikatakan sebagai perbedaan intensitas luminans atau warna sehingga suatu objek bisa dilihat atau dibedakan.

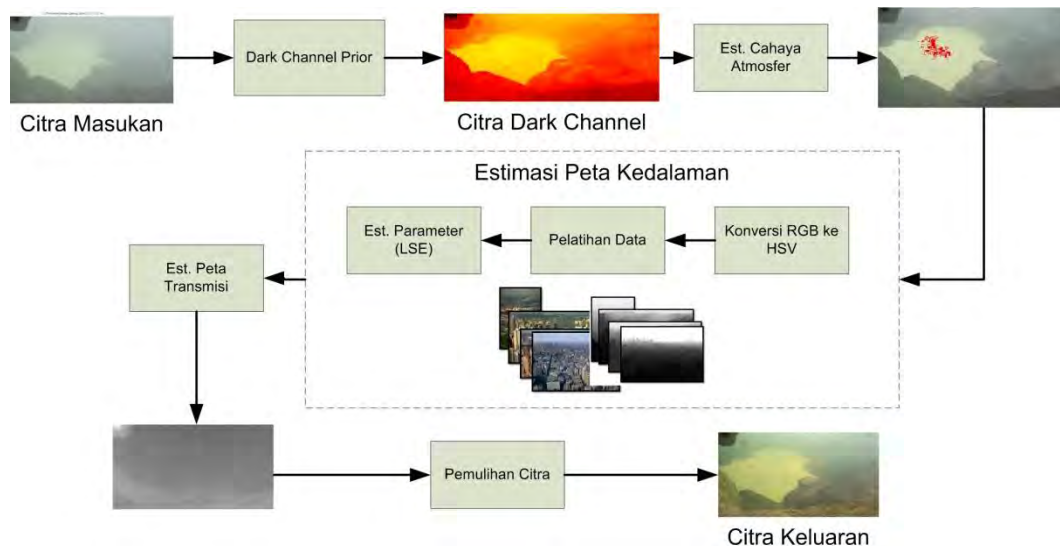
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

Kabut sering terjadi di puncak gunung karena solfatar [2], [5], [17]. Reaksi kimia ini melepaskan banyak jenis gas, seperti: SO₂, H₂O, karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO₂), H₂S, N₂. Apalagi jika gas tertentu berinteraksi dengan batuan, maka akan menimbulkan senyawa lain. Sebagian besar, pancaran sinar matahari di citra latar dipengaruhi oleh sekitarnya. Pencahayaan ini berasal dari tumbuh-tumbuhan di sekitar danau dan dari warna danau itu sendiri. *Airlight* memainkan peran besar dalam *dehazing*, terutama *dark channel prior* (DCP). Dalam kasus ini, tampilan kamera tidak menutupi area langit.

Model degradasi pada persamaan (2.1) biasa digunakan untuk menggambarkan pembentukan gambar dengan adanya kabut [23], [33], [34]. Serupa dengan tujuan dari penelitian ini, kita tertarik untuk memulihkan **J** yang merupakan citra yang menunjukkan pemandangan melalui medium yang bebas kabut.



Gambar 3.1. Tahapan metodologi penelitian reduksi kabut.

Dari waktu ke waktu, warna pemandangan terus berubah. Dalam kondisi awan tebal, warnanya menjadi hijau tua. Dan dalam kondisi jernih, warnanya menjadi coklat muda. Berdasarkan kondisi tersebut, penulis terutama fokus pada

pemulihan warna danau dalam kondisi kabur. Pada bagian ini, metode yang diusulkan dijabarkan. Penulis berfokus pada proses *dehazing* untuk menghasilkan pemandangan yang lebih alami.

Tahapan metode yang digunakan dalam penelitian ini, pertama adalah melakukan proses *dark channeling*. Kedua, cahaya atmosfer dalam gambar saluran gelap diestimasi. Langkah selanjutnya adalah menentukan kedalaman gambar kabur masukan menggunakan model kedalaman. Setelah kedalaman ditentukan, peta transmisi medium diestimasi, dan pemulihan citra sebagaimana pada Gambar 3.1. Adapun penjelasan secara terperinci, maka akan dibahas pada subbab berikut.

3.1 Dark Channel Prior

Pada dasarnya, *dark channel prior* adalah pendekatan yang berbasis statistik. Jika kita amati pada citra, yang tidak terlibat di dalamnya area berwarna putih seperti langit, pada beberapa piksel, paling tidak satu saluran warna (RGB) yang memiliki kecenderungan intensitas rendah [24], [42]. Bahkan, intensitas tersebut bisa mendekati nol. Piksel-piksel inilah yang selanjutnya disebut sebagai piksel gelap atau *dark pixels*. Dari informasi inilah bisa diasumsikan bahwa peta transmisi dari kabut bisa diestimasi dengan akurat. Karena, pada area yang berkabut, pada piksel tertentu, ketiga saluran warna RGB masing-masing memiliki kecenderungan intensitas yang tinggi. Sehingga, intensitas yang tinggi inilah menyebabkan warna dari citra menjadi cenderung putih.

Pada bagian berikut ini, penjelasan tentang pengamatan *dark channel prior* akan dipaparkan. Kemudian, model matematika dari *dark channel prior* juga akan dijelaskan lebih rinci.

3.1.1 Pengamatan

Ada beberapa hal yang menjadi pertimbangan dari konsep *dark channel*. Pertama, pengamatan ini semata-mata berdasarkan kondisi luar yang cerah. Ada kalanya, pada sebagian besar kondisi cerah, konsep dari *dark channel* itu berlaku. Namun, ada juga sebagian kecil dari suatu kondisi pemandangan yang menjadikan konsep ini tidak berjalan.

Kedua, konsep ini lebih sesuai dengan kondisi di luar ruangan dibanding dengan kondisi di dalam ruangan. Hal ini disebabkan karena kondisi di luar ruangan memiliki konten yang banyak. Contoh dari keadaan ini adalah pemandangan pegunungan. Jika dilihat, objek dari pemandangan tersebut bisa dibagi berdasar jarak, misalnya, objek jarak dekat, objek jarak menengah, dan objek jarak jauh. Sebagai contoh untuk objek jarak dekat, jika mengambil pemandangan yang menjadikan gunung sebagai latar belakang, pohon dan rumah. Ada juga rumah dan sawah untuk jarak menengah. Selain itu, kabut itu terjadi di luar ruangan.

Ketiga, intensitas dari suatu piksel tidak hanya berasal dari sumber cahaya maupun dari pantulan cahaya [24], [34], [35] dari permukaan objek itu sendiri, tetapi juga bisa berasal dari kamera yang digunakan untuk mengambil citra pemandangan itu sendiri. Jika seseorang mengambil citra daub berwarna hijau gelap, namun, kamera orang tersebut menggunakan setelan *exposure* yang tinggi, maka akan menyebabkan warna daun tersebut memiliki intensitas lebih tinggi dibanding dengan diambil dengan kondisi *exposure* normal. Jadi, asumsinya, citra apapun yang dalam konsep ini diambil dalam kondisi setelan *exposure* yang sewajarnya.

3.1.2 Model Formula

Pada bagian ini, kami akan menjelaskan secara rinci terkait formula dari *dark channel*. *Dark channel* didefinisikan bahwa dalam beberapa piksel dari suatu citra, salah satu saluran warna RGB memiliki intensitas yang rendah bahkan cenderung mendekati nol. Intensitas rendah ini berada di bawah suatu nilai ambang batas γ :

$$J_{\text{dark}}(\mathbf{x}) = \min_{c \in \{r, g, b\}} J_c(x), \quad (3.1)$$

Jika $J_{\text{dark}}(x)$ pada persamaan (3.1) adalah piksel gelap pada koordinat piksel x maka *dark channel* pada koordinat piksel lain p bisa ditulis sebagai $J_{\text{dark}}(p)$ selama memenuhi syarat:

$$\min_{c \in \{r, g, b\}} J_c(p) \leq \min_{c \in \{r, g, b\}} J_c(x), \quad (3.2)$$

Kondisi pada persamaan (3.2) bisa dipenuhi jika pada suatu jendela blok dengan ukuran tertentu mengandung minimal satu piksel gelap. Jendela blok didefinisikan secara simbol sebagai Ω , maka:

$$\min_{p \in \Omega} \left(\min_{c \in \{r, g, b\}} J_c(p) \right) \approx 0, \quad (3.3)$$

Dikarenakan nilai dari γ sangat rendah, maka bisa diabaikan.

3.1.3 Dark Channel

Pada persamaan (3.3), simbol $\Omega(x)$ adalah sebagai jendela blok yang terletak pada pusat suatu koordinat x . Disebutkan bahwa citra cerah sebagai **J** maka, *dark channel* dari citra **J** adalah:

$$J_{dark} = \min_{p \in \Omega} \left(\min_{c \in \{r, g, b\}} J_c(p) \right), \quad (3.4)$$

Dark channel adalah hasil perhitungan dua operator minimum. Yang pertama adalah operator $\min_{c \in \{r, g, b\}}$. Operator ini mengambil saluran warna RGB minimal tiap piksel. Kedua adalah operator $\min_{p \in \Omega(x)}$. Operator kedua ini memproses tiap piksel dari jendela blok dalam ukuran tertentu.

Pada dasarnya, proses perhitungan dari *dark channel* digunakan untuk objek berupa citra. Citra yang diproses tidak terikat harus benar-benar cerah yang dalam kata lain tidak mengandung kabut. Jadi, operator *dark channel* bisa digunakan untuk semua citra baik berkabut maupun tidak. Jika *dark channel* dari citra yang cerah bisa diperoleh dari persamaan (3.4), maka *dark channel* dari citra berkabut I adalah:

$$I_{dark}(x) = \min_{p \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{r, g, b\}} I_c(p) \right), \quad (3.5)$$

Di mana $I_{dark}(x)$ adalah citra hasil perhitungan operator minimum untuk citra kabut, sedangkan p adalah koordinat citra pada titik p , dan $\Omega(x)$ adalah koordinat x pada jendela blok yang berpusat di titik p . Kata "*prior*" memiliki makna yang bisa berarti asumsi yang dibangun sebelum proses inti. Jika citra *dark channel*:

$$J_{dark}(x) \approx 0, \quad (3.6)$$

symbol \approx memiliki makna pada persamaan (3.6) di mana intensitas tiap piksel dalam *dark channel* mendekati nol, maka asumsi inilah yang disebut dengan *dark channel prior*.

Berdasarkan penelitian dari [24], sebanyak 5000 *dark channel* dari citra luar ruangan tanpa kabut menunjukkan bahwa sebanyak 75 persen piksel dari *dark channel* memiliki nilai nol dan 90 persen memiliki intensitas nilai di bawah 35 ketika area langit dimasukkan dalam proses.

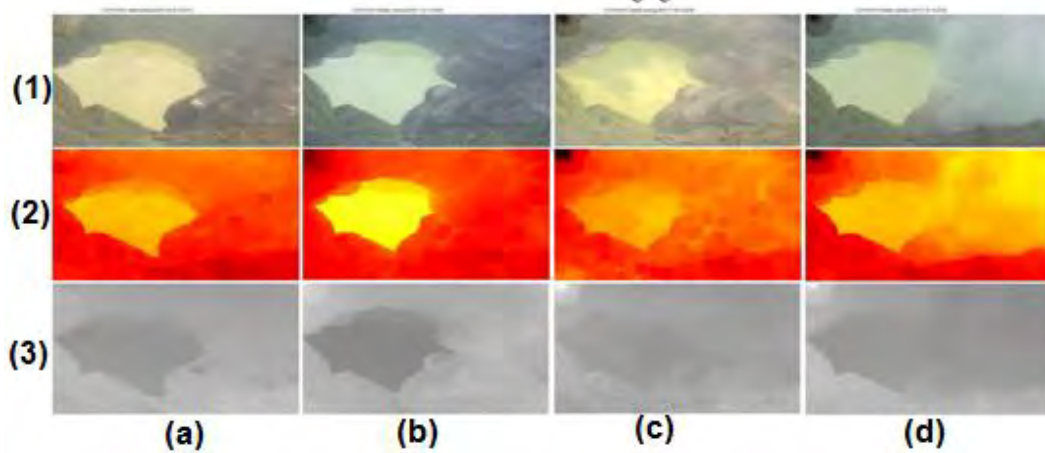
Di sisi lain, *dark channels* dari citra berkabut menghasilkan piksel yang memiliki nilai jauh di atas nol. Cahaya atmosfer global yang cenderung akromatis (cenderung memiliki warna abu-abu atau putih) dengan intensitas kecerahan tinggi dan campuran *airlight* dan pelemahan langsung menyebabkan meningkatnya nilai minimum dari tiga saluran warna pada jendela blok lokal [46]. Dari sini bisa disimpulkan bahwa nilai-nilai piksel dari *dark channel* bisa menjadi kunci penting dalam proses estimasi ketebalan kabut.

3.2 Estimasi Cahaya Atmosfer

Pada bagian ini, kami akan menjelaskan secara rinci bagaimana estimasi cahaya atmosfer dilakukan. Cahaya atmosfer disimbolkan sebagai **A**. Perlu diketahui bahwa objek apapun dalam citra bisa saja menjadi sumber cahaya. Radiasi cahaya matahari yang merambat melalui medium udara, kemudian mengenai permukaan objek jika intensitas efek pantulan dari objek tersebut cenderung tinggi, maka objek ini bisa menjadi sumber cahaya.

Dalam citra pemandangan alam, di mana proporsi pemandangannya memadai, mata manusia bisa dengan jelas membedakan antara langit dan daratan. Sebagian besar, area langit merupakan sumber cahaya. Sinar matahari menyebar melalui atmosfer. Ketika melewati dengan awan tebal, cahaya tersebar [33], [49]. Dispersi ini menyebabkan awan menjadi lebih cerah. Kemungkinan lain yang bisa menjadi sumber cahaya adalah obyek yang memantulkan sinar matahari. Objek yang lebih terang dari langit bisa sangat mempengaruhi pancaran pemandangan. Karena posisi kamera di atas gunung Kelud langsung menghadap ke danau dan

danau tersebut memantulkan sinar matahari dengan cuaca yang baik sehingga sulit untuk memperkirakan cahaya atmosfer.



Gambar 3.2. Citra kabut kawah gunung Kelud. (1) adalah citra inputan, (2) adalah hasil estimasi cahaya atmosfer pada citra *dark channel*, (3) peta transmisi, (a)-(d) adalah citra kawah pada kondisi beragam kondisi beserta citra *dark channel* dan peta tranmisisnya.

Selain itu, kabut yang dipancarkan kadangkala bisa menjadi sumber cahaya sebagaimana pada Gambar 3.2(b)(4). Fenomena sumber cahaya lainnya berasal dari benda yang memantulkan cahaya seperti yang terlihat pada Gambar 3.2(b) (1) - (3). Hal ini dapat dibuktikan dengan menggunakan asumsi DCP [21], [24] dengan memilih warna paling terang atau menggunakan *quad-tree subdivision* dari Kim *et al*[27].

Ada kalanya cahaya matahari merambat melalui udara, kemudian melewati kumpulan kabut, asap, atau uap air. Maka, cahaya tersebut akan disebarkan oleh partikel-partikel air di udara [33], [34]. Dari efek penyebaran inilah akan menimbulkan efek seolah-olah kumpulan asap, kabut, atau awan memancarkan cahaya.

Estimasi cahaya atmosfer merupakan hal yang menantang. Banyak cara dalam menentukan sumber cahaya. Dalam kasus ini, kami menggunakan asumsi bahwa piksel dari citra *dark channel* yang memiliki intensitas tinggi adalah sumber cahaya. Kami mengurutkan piksel-piksel tersebut berdasarkan intensitas dari tertinggi ke intensitas paling rendah. Dari data urutan tersebut, diambil piksel-piksel dengan intensitas tertinggi sebanyak 0.1 %. Kami mengasumsikan bahwa

piksel-piksel dengan intensitas tertinggi dari *dark channel* adalah **A**, di mana **A** sumber cahaya atmosfer.

Objek yang berada di kejauhan dari suatu citra pemandangan cenderung memiliki warna yang kebiru-biruan dan berkabut. Kesan ini ditimbulkan karena adanya efek *aerial perspective* [50]. Dikarenakan kondisi ini, secara umum, kabut yang berada di kejauhan bisa menjadi sumber cahaya. Metode estimasi cahaya atmosfer **A** ini tidak hanya bisa digunakan untuk objek pemandangan yang jauh, tetapi juga bisa untuk objek yang relatif dekat. Kondisi objek yang dekat kadang tidak mencakup area yang menjadi sumber cahaya global seperti langit atau awan. Meskipun ada sedikit kabut yang padat, metode ini juga bisa digunakan untuk estimasi.

3.3 Estimasi Peta Transmisi

Estimasi peta transmisi merupakan permasalahan yang bisa disebut dengan *ill-posed problem*. Suatu permasalahan dikatakan *ill-posed problem* jika solusi dari permasalahan tersebut bisa lebih dari satu dan dikembangkan secara terus menerus. Hal ini dikarenakan adanya besarnya nilai *error* dari suatu solusi permasalahan [22], [51]. Telah banyak dikembangkan metode estimasi peta transmisi, diantaranya [21], [24], [52].

3.3.1 Estimasi Transmisi Berbasis Kedalaman

Pada bagian ini, estimasi peta kedalaman dilakukan secara bertahap. Proses estimasi peta transmisi yang dikembangkan oleh [24] adalah berbasis *dark channel*. Jika mengingat kembali model citra kabut pada persamaan (2.1) dan estimasi cahaya atmosfer **A** sudah diketahui, maka kita bisa melakukan operasi pada persamaan (2.1) dengan cara membagi masing-masing sisi oleh A_c . Sehingga diperoleh:

$$\frac{I_c(x)}{A_c} = \frac{J(x)}{A_c} t(x) + 1 - t(x), \quad (3.7)$$

Simbol c di sini adalah saluran warna RGB. Artinya, operasi ini diproses secara independen untuk tiap saluran. Jika menggunakan asumsi *dark channel* sebagaimana yang terdapat pada persamaan (3.4) dan (3.5), maka sisi kiri dan sisi

kanan dari persamaan (3.7) bisa dilakukan operasi minimum. Dari sini kita sudah dapat:

$$\min_{p \in \Omega(x)} \min_c \left(\frac{I_c(p)}{A_c} \right) = \min_{p \in \Omega(x)} \min_c \left(\frac{I_c(p)}{A_c} t(p) + 1 - t(p) \right), \quad (3.8)$$

Peubah cadalah bentuk sederhana dari operasi $\min_{c \in \{r, g, b\}}$. Jika dalam setiap jendela blok kecenderungan memiliki intensitas sama, maka bisa diasumsikan bahwa nilai $t(p)$ pada jendela blok tersebut seragam. Dikarenakan seragam, maka $t(p)$ bisa dipisah dari sisi kanan persamaan (3.8), sehingga diperoleh:

$$\min_{p \in \Omega(x)} \min_c \left(\frac{I_c(p)}{A_c} \right) = t(p) \min_{p \in \Omega(x)} \min_c \left(\frac{I_c(p)}{A_c} \right) + 1 - t(p), \quad (3.9)$$

Simbol J adalah mewakili citra yang cerah. Melihat kembali pada persamaan (3.4) dan (3.6), kita bisa mengetahui bahwa konsekuensi dari konsep *dark channel prior* adalah:

$$\min_{p \in \Omega(x)} \min_c \left(\frac{I_c(p)}{A_c} \right) \equiv J_{dark}(x) \approx 0, \quad (3.10)$$

Jika nilai intensitas A_c selalu positif, maka dengan memasukkan persamaan (3.10) ke persamaan (3.9), kita memiliki:

$$t(p) = 1 - \min_{p \in \Omega(p)} \min_c \left(\frac{I_c(p)}{A_c} \right), \quad (3.11)$$

Sebagaimana yang telah disebutkan pada pembahasan sebelumnya bahwa *dark channel prior* tidak bisa digunakan untuk area langit. Namun, area langit jika dilihat pada suatu citra pemandangan, intensitasnya akan mendekati intensitas sumber cahaya **A** atau bahkan sering diasumsikan sebagai sumber cahaya **A**. Jika dalam suatu citra memiliki kedalaman d , dikarenakan kondisi pada area langit yang mendekati tak terhingga, maka $d \rightarrow \infty$ dan nilai dari $t \rightarrow 0$

Permasalahan dari asumsi ini adalah bahwa besarnya nilai transmisi t sangat bergantung dengan nilai **A**. Peta transmisi yang dihasilkan dari persamaan (3.11) efektif digunakan sebagai pemulihan untuk citra yang memiliki komposisi warna yang jelas. Jika ada objek dari citra yang memiliki intensitas

mendekati atau sama dengan besarnya A , maka transmisi untuk objek tersebut akan cenderung mendekati nilai 1.

3.3.2 Korelasi Kedalaman, Saturasi, dan Kecerahan

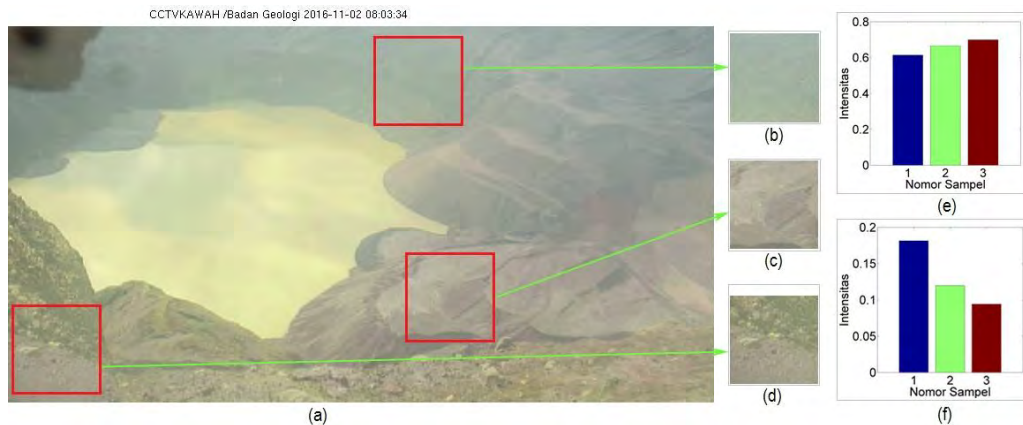
Pada pembahasan sebelumnya, jika kecenderungan dari intensitas kabut yang mendekati seolah-olah sebagai sumber cahaya, maka bisa didefinisikan sebagai:

$$I_c(x) = A_c, \quad (3.12)$$

Dikarenakan terjadi kesamaan antara area kabut dengan sumber cahaya, maka fungsi dari restorasi citra dari kabut berubah menjadi estimasi kedalaman d . Berdasarkan model transmisi dari [33], [37], maka nilai t bisa dirumuskan dengan:

$$t(x) = e^{-\beta d(x)}, \quad (3.13)$$

Di mana β adalah koefisien sebaran cahaya di atmosfer. d adalah kedalaman dari citra, dan x adalah pusat koordinat piksel. Dalam kondisi atmosfer yang homogen [24], [33], nilai dari β bisa dianggap 1.



Gambar 3.3. Korelasi kepadatan kabut dengan saturasi dan kecerahan. (a) adalah citra kawah kelud, (b) adalah sampel blok dengan jarak jauh, (c) sampel blok dengan jarak menengah, (d) sampel blok dengan jarak dekat, (e) grafik perubahan nilai kecerahan pada masing-masing blok, (f) adalah grafik perubahan nilai saturasi pada masing-masing blok. Nomor sampel 1 adalah blok jarak dekat, nomor 2 adalah blok jarak menengah, dan nomor 3 adalah blok jarak jauh

Jika pengamatan secara visual, mata manusia dengan mudah akan mampu mengidentifikasi kabut pada pemandangan alam. Inilah yang menginspirasi [21], sehingga ditemukan adanya korelasi antara kedalaman dengan saturasi dan tingkat kecerahan suatu citra. Korelasi ini berdasarkan hasil pengamatan secara statistik. Jika pada [21] menggunakan citra pemandangan alam yang cerah, maka dalam kasus ini, kami mengamati korelasi fitur saturasi dan kecerahan untuk data citra gunung Kelud. Hal ini dikarenakan citra yang dihasilkan dari kamera pengawas cenderung agak buram. Kami mengambil dan membagi tiga sampel berdasarkan jarak yang berupa jendela blok berukuran 40 x 40 piksel. Sampel pertama, kedua, dan ketiga untuk jarak dekat, menengah, dan jauh secara berurutan.

Pengamatan ini dibagi menjadi dua bagian, yaitu pengamatan saturasi dan kecerahan. Pada pengamatan saturasi dan kecerahan, untuk sampel pertama kami menghitung nilai rata-rata saturasi dan kecerahan. Nilai yang didapat dari perhitungan ini menghasilkan nilai saturasi yang cenderung tinggi. Sedangkan nilai dari rata-rata kecerahan cenderung rendah. Untuk sampel kedua, nilai saturasi dan kecerahan cenderung sama.

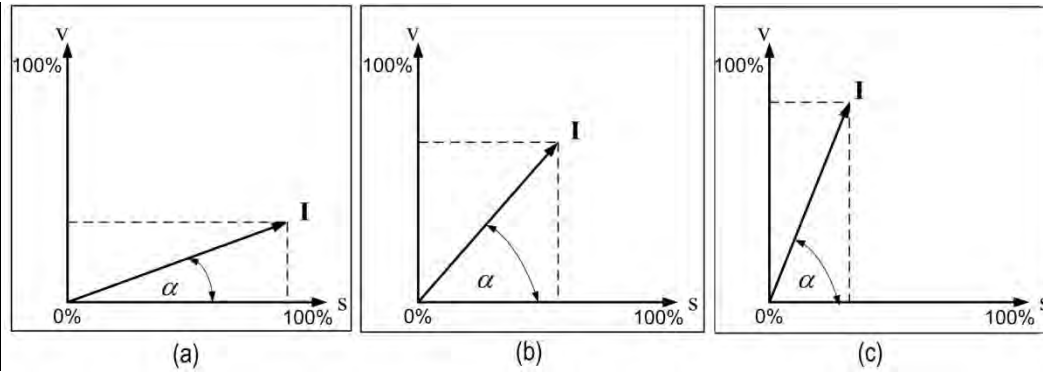
Pada sampel ketiga, nilai saturasi cenderung rendah bahkan mendekati nol. Sedangkan nilai kecerahan cenderung tinggi. Perbedaan nilai antara saturasi dan kecerahan untuk sampel satu dan sampel tiga cenderung tinggi. Sedangkan untuk sampel kedua ada perbedaan nilai antara saturasi dan kecerahan namun tidak terlalu besar. Perbedaan nilai intensitas saturasi dan kecerahan bisa dilihat lebih jelas pada Gambar 3.3.

Gambar 3.3 menunjukkan korelasi antara tingkat kepadatan kabut dengan tingkat saturasi dan kecerahan. Gambar 3.3 (e) dan Gambar 3.3 (f) menunjukkan perubahan nilai rata-rata intensitas terhadap jarak untuk kecerahan dan saturasi secara urut. Gambar 3.3 juga menunjukkan contoh bagaimana kecerahan dan saturasi dari piksel bervariasi dalam citra berkabut. Sebagai diilustrasikan pada Gambar 3.3 (d), untuk region dengan kondisi bebas kabut, saturasi dari latar cenderung lebih tinggi, dan kecerahan cenderung lebih rendah dan perbedaan antara kecerahan dan saturasi cenderung mendekati nol. Tetapi, jika diamati dari Gambar 3.3(c) bahwa jendela blok saturasi menurun tajam ketika warna dari latar

memudar di bawah pengaruh kabut, dan kecerahan meningkat seiring dengan meningkatnya perbedaan nilai saturasi dan kecerahan. Lebih jauh lagi, Gambar 3.3 (b) menunjukkan bahwa pada region dengan kabut padat sangat sulit untuk menentukan warna yang melekat pada objek latar. Ketiga atribut (saturasi, kecerahan, dan kedalaman) memiliki sifat variasi yang berpola berdasarkan pengamatan ini.

Pada citra dengan kondisi yang bebas kabut, elemen dari latar memantulkan energi yang berasal dari objek yang mengemisi cahaya [21] (seperti: cahaya matahari langsung, hamburan dari langit, dan cahaya yang dipantulkan dari permukaan air). Pada sistem pencitraan menunjukkan bahwa energi yang dipantulkan dari elemen latar dan difokuskan menuju koordinat citra. Tanpa pengaruh dari kabut, citra luar ruangan biasanya mengandung warna yang jelas. Sedangkan pada kondisi berkabut, situasi tersebut menjadi lebih kompleks, yaitu terkait dengan pelemahan langsung dan *airlight* sebagaimana yang telah disebutkan pada pembahasan sebelumnya.

Proses pelemahan langsung ini disebabkan karena adanya pengurangan energi yang menimbulkan turunya nilai intensitas kecerahan. Nilai kecerahan cenderung berkurang jika terkena dampak pelemahan langsung. Di sisi lain, cahaya putih atau abu-abu, yang terbentuk karena penerangan oleh lingkungan, menaikkan intensitas kecerahan dan menurunkan intensitas saturasi. Sisi kanan dari persamaan 2.1 $A(1 - t(x))$ merepresentasikan efek dari *airlight*. Dari istilah ini bisa disimpulkan bahwa efek putih atau abu-abu dari *airlight* terhadap pengamat adalah berfungsi sebagai tambahan. Sehingga, kecerahan meningkat dan saturasi menurun disebabkan oleh adanya *airlight*. Karena *airlight* berperan besar dalam sebagian besar kasus, region berkabut dari suatu citra memiliki ciri-ciri yaitu intensitas kecerahan tinggi dan saturasi yang rendah.



Gambar 3.4. Perubahan nilai α untuk tiap-tiap kedalaman. 3-2(a) besar nilai α untuk jarak dekat, 3-2(b) besar nilai α untuk jarak menengah, dan 3-2(c) besar nilai α untuk jarak jauh

Yang lebih penting lagi, semakin tebal kabut maka semakin besar pula pengaruh *airlight*. Dari pengamatan ini, maka selisih dari nilai saturasi dan kecerahan bisa digunakan untuk melakukan estimasi dari kepadatan kabut. Jika dilihat dari hasil pengamatan saturasi dan kecerahan terhadap kedalaman, maka akan diperoleh korelasi antara ketiganya. Seiring dengan bertambahnya nilai kedalaman dari citra bertambah pula nilai kecerahan dan berkurang pula nilai saturasi. Bisa dikatakan juga bahwa konsentrasi kabut untuk jarak yang jauh akan bertambah seiring dengan kedalaman. Karena kondisi ini, maka antara kedalaman dengan kecerahan serta saturasi terdapat korelasi secara positif. Dari sini, bisa dimodelkan korelasi antara keempat peubah (kedalaman, konsentrasi, kecerahan, dan saturasi), yaitu:

$$d(x) \propto c(x) \propto v(x) - s(x), \quad (3.14)$$

di mana d adalah kedalaman citra, c adalah konsentrasi kabut, v adalah nilai intensitas kecerahan, dan s adalah nilai intensitas saturasi.

Korelasi ini juga bisa dimodelkan secara geometri. Nilai saturasi dan kecerahan diambil dari model warna HSV. Sedangkan nilai hue abaikan. Vektor **I** menunjukkan citra kabut yang diproyeksikan dari titik awal menuju suatu titik dengan arah sebesar α . Nilai dari α berada antara 0 hingga 90 derajat. Semakin besar nilai α maka semakin besar pula perbedaan antara komponen **I** yang mengarah ke **V** daripada komponen **I** yang mengarah ke **S** sebagaimana pada Gambar 3.4. Sebagaimana nilai kedalaman bertambah, maka bertambah nilai v dan

berkurang nilai s , sehingga bertambah pula nilai α . Dengan kata lain, nilai α berkorelasi secara positif terhadap nilai kedalaman d .

Jika perbedaan antara nilai saturasi dan kecerahan merepresentasikan konsentrasi kabut, maka model kedalaman secara linier bisa ditentukan oleh:

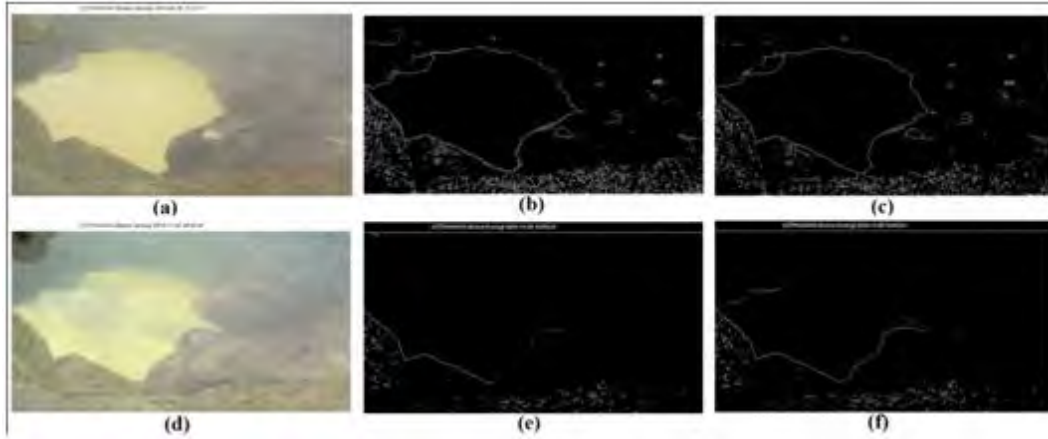
$$d(x) = \lambda_1 + \lambda_2 v(x) + \lambda_3 s(x) + \varepsilon(x) \quad (3.15)$$

di mana d adalah kedalaman, x adalah koordinat dari citra, v adalah intensitas komponen kecerahan, s adalah intensitas komponen saturasi, ε adalah peubah acak yang mewakili nilai kesalahan acak dari model, dan λ_1 , λ_2 , dan λ_3 adalah koefisien linier yang nilainya masih belum diketahui.

Salah satu kelebihan dari model pada persamaan (3.15) adalah kemampuan untuk menjaga tepi (*edge-preserving*). Untuk mengilustrasikan ini, gradien dari d pada persamaan (3.15) bisa ditulis dengan:

$$\nabla d = \lambda_1 \nabla v + \lambda_2 \nabla s + \nabla \varepsilon \quad (3.16)$$

Informasi tepi dari citra ∇d dengan nilai parameter $\lambda_1 = 1$ dan $\lambda_2 = -1$ dibandingkan dengan citra tepi Sobel dengan nilai ambang batas 0.05. Citra gradien ∇d sebagaimana pada Gambar 3.5 (b) dan Gambar 3.5(e) dan citra Sobel sebagaimana pada Gambar 3.5(c) dan Gambar 3.5(f) sama-sama gelap. Dari hasil perbandingan ini, karena nilai v dan s adalah dua saluran tunggal citra (berasal dari ruang warna HSV) persamaan (3.16) memperjelas bahwa d memiliki tepi nilai dari I juga memiliki tepi. Contoh ilustrasi sebagaimana pada Gambar 3.5. Gambar 3.5(b) dan Gambar 3.5(c) menunjukkan distribusi tepi dari citra berkabut dengan kondisi agak cerah. Sedangkan Gambar 3.5(e) dan Gambar 3.5(f) adalah citra tepi dari kawah Kelud dengan kondisi agak berkabut. Kedua citra sobel dan ∇d memiliki distribusi properti tepi yang mirip. Dari kondisi ini menunjukkan bahwa informasi tepi dari kedalaman tidak hilang.



Gambar 3.5. Citra tepi dari kawah Kelud dalam kondisi berbeda. (a) adalah citra kawah kelud sebelum pembuatan terowongan, (b) dan (c) adalah citra tepi dari kedalaman dan sobel, (d) adalah citra kawah sesudah pembuatan terowongan, (e) dan (f) adalah citra tepi dari kedalaman dan sobel.

3.3.3 Least Squares Estimation

Jika model dari kedalaman sebagaimana pada persamaan(3.15), parameter dari persamaan tersebut sudah diketahui, dan data yang diobservasi juga sudah ada, maka tahap berikutnya adalah menemukan nilai parameter dari λ_1 , λ_2 , dan λ_3 . Proses dari menemukan nilai parameter ini yang selanjutnya disebut dengan estimasi parameter.

Secara umum, ada dua metode untuk estimasi nilai parameter, yaitu *least-squares estimation* (LSE) dan *maximum likelihood estimation* (MLE) [53]. Metode LSE sudah lama digunakan untuk banyak konsep statistik, seperti: regresi linier, *sum of squared errors*, dan *root mean-squared deviation*. Dikarenakan pola dari sebaran data yang cenderung linier, maka kami menggunakan metode LSE dalam estimasi parameter. Tujuan dari LSE adalah meminimalkan kesalahan ε . Dari persamaan (3.15), kita mempunyai:

$$R = d(x) - (\lambda_1 + \lambda_2 v(x) + \lambda_3 s(x)), \quad (3.17)$$

di mana R adalah fungsi *cost*. Jika dikuadratkan persamaan (3.17), maka:

$$R^2 = \sum_{i=1}^n (d_i - (\lambda_1 + \lambda_2 v_i + \lambda_3 s_i))^2, \quad (3.18)$$

Dari persamaan (3.18), n adalah jumlah titik dari masing-masing citra, d_i adalah kedalaman dari piksel ke- i , v_i dan s_i adalah nilai intensitas kecerahan dan saturasi

dari piksel ke- i secara urut. Tujuan dari LSE adalah meminimalkan kesalahan dari R^2 .

Selanjutnya adalah melakukan estimasi masing-masing parameter λ_1 , λ_2 , dan λ_3 dengan cara mencari turunan parsial pertama dari persamaan (3.17) untuk tiap-tiap parameter. Turunan parsial dari parameter adalah:

$$\frac{\partial R^2}{\partial \lambda_1} = 0 \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial R^2}{\partial \lambda_2} = 0 \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial R^2}{\partial \lambda_3} = 0 \quad (3.21)$$

Jika diturunkan persamaan (3.19) terhadap λ_1 , maka akan dihasilkan:

$$-2 \sum_{i=1}^n (d_i - \lambda_1 - \lambda_2 v_i - \lambda_3 s_i) = 0, \quad (3.22)$$

Sehingga, persamaan (3.20) bila dijabarkan akan menjadi:

$$\lambda_1 \sum_{i=1}^n 1 + \lambda_2 \sum_{i=1}^n v_i + \lambda_3 \sum_{i=1}^n s_i = \sum_{i=1}^n d_i, \quad (3.23)$$

Selanjutnya, jika persamaan (3.18) diturunkan terhadap λ_2 , maka:

$$-2 \sum_{i=1}^n (d_i v_i - \lambda_1 v_i - \lambda_2 v_i^2 - \lambda_3 v_i s_i) = 0, \quad (3.24)$$

Apabila dijabarkan persamaan (3.24), maka kita mendapat:

$$\lambda_1 \sum_{i=1}^n v_i + \lambda_2 \sum_{i=1}^n v_i^2 + \lambda_3 \sum_{i=1}^n v_i s_i = \sum_{i=1}^n d_i v_i, \quad (3.25)$$

Terakhir, jika persamaan (3.18) diturunkan terhadap λ_3 , maka akan dihasilkan:

$$-2 \sum_{i=1}^n (d_i s_i - \lambda_1 s_i - \lambda_2 v_i s_i - \lambda_3 s_i^2) = 0, \quad (3.26)$$

Bila dijabarkan dari persamaan (3.25), maka didapat:

$$\lambda_1 \sum_{i=1}^n s_i + \lambda_2 \sum_{i=1}^n v_i s_i + \lambda_3 \sum_{i=1}^n s_i^2 = \sum_{i=1}^n d_i s_i, \quad (3.27)$$

Untuk menyederhanakan proses penyelesaian LSE untuk persamaan (3.23), (3.25), dan (3.27), maka bisa digunakan bentuk matriks. Bentuk umum dari matriks untuk persamaan linier adalah:

$$\begin{bmatrix} f(x_0) \\ f(x_1) \\ f(x_2) \\ \vdots \\ f(x_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ 1 & x_{31} & x_{32} & \dots & x_{3k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Dimana $f(x_0), f(x_1), \dots, f(x_n)$ adalah fungsi dari persamaan, i adalah persamaan ke- i , k adalah jumlah peubah, $x_{11}, x_{n2}, \dots, x_{nk}$ adalah peubah fungsi, $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_n$ adalah koefisien parameter dari fungsi, dan $\varepsilon_0, \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n$ adalah peubah kesalahan acak.

Jika \mathbf{y} didefinisikan sebagai vektor dari $f(x_i)$, \mathbf{X} sebagai matriks dari peubah fungsi, $\boldsymbol{\lambda}$ sebagai vektor parameter koefisien, dan $\boldsymbol{\varepsilon}$ sebagai vektor dari kesalahan acak, maka persamaan (3.28) dan (3.17) bisa didefinisikan kembali sebagai:

$$\mathbf{R} = \mathbf{y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\lambda}, \quad (3.29)$$

di mana \mathbf{R} sebagai kesalahan acak. Dari persamaan (3.28), kita mempunyai:

$$\mathbf{R}^2 = (\mathbf{y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\lambda})^T (\mathbf{y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\lambda}), \quad (3.30)$$

Simbol T pada persamaan (3.30) adalah matriks tranpos. Maka, hasil perkalian dari persamaan (3.30) adalah

$$\mathbf{R}^2 = \mathbf{y}^T \mathbf{y} - \mathbf{y}^T \mathbf{X} \boldsymbol{\lambda} - \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{X}^T \mathbf{y} + \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{X}^T \mathbf{X} \boldsymbol{\lambda}, \quad (3.31)$$

$$\mathbf{R}^2 = \mathbf{y}^T \mathbf{y} - 2\mathbf{y}^T \mathbf{X} \boldsymbol{\lambda} + \boldsymbol{\lambda}^T (\mathbf{X}^T \mathbf{X}) \boldsymbol{\lambda}, \quad (3.32)$$

$$\frac{\partial \mathbf{R}^2}{\partial \boldsymbol{\lambda}} = -2\mathbf{y}^T \mathbf{X} + 2\mathbf{X}^T \mathbf{X} \boldsymbol{\lambda}, \quad (3.33)$$

Karena $(\partial \mathbf{R}^2 / \partial \boldsymbol{\lambda}) = 0$ untuk meminimalkan \mathbf{R}^2 , maka persamaan (3.33) menjadi:

$$\mathbf{X}^T \mathbf{X} \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{y}^T \mathbf{X}, \quad (3.34)$$

dimana $\boldsymbol{\lambda}$ adalah vektor parameter koefisien yang dicari, \mathbf{X} adalah matriks peubah untuk kecerahan dan saturasi, dan \mathbf{y} adalah vektor dari kedalaman. Jika peubah v dan s termasuk bagian dari matriks \mathbf{X} , d adalah vektor \mathbf{y} , $\boldsymbol{\lambda}$ adalah vektor parameter koefisien, maka:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & v_0 & s_0 \\ 1 & v_1 & s_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & v_n & s_n \end{bmatrix}, \mathbf{y} = \begin{bmatrix} d_0 \\ d_1 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix}, \boldsymbol{\lambda} = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Sehingga, nilai parameter koefisien λ_1, λ_2 , dan λ_3 adalah:

$$\boldsymbol{\lambda} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{y}^T \mathbf{X}, \quad (3.36)$$

Dari hasil nilai-nilai parameter $\boldsymbol{\lambda}$, maka persamaan (3.35) bisa digunakan untuk estimasi kedalaman pada persamaan (3.15). Tahapan berikutnya adalah melakukan proses estimasi terhadap peta transmisi.

3.3.4 Strategi Pembelajaran

Estimasi berbasis *dark channel* pada pembahasan sebelumnya sangat bergantung dengan besarnya nilai intensitas \mathbf{A} . Merujuk kembali pada persamaan (3.13), (3.15), dan (3.36), maka nilai estimasi dari peta tranmisi $t(x)$ bisa ditentukan. Tapi, sebelum melakukan estimasi parameter, ada beberapa peubah yang menjadi masukan dari proses estimasi tersebut.

Meskipun teknik dalam pembelajaran sudah diketahui sebagaimana dalam persamaan (3.36), mencari data untuk persiapan pembelajaran tidaklah mudah. Sangat sulit untuk mengukur peta kedalaman dari citra luar ruangan. Sebaliknya, untuk mendapatkan peta kedalaman dari citra dalam ruangan cukup mudah. Untuk mendapatkan peta kedalaman yang akurat, kami menggunakan data kedalaman dari [54]. Dari data yang diperoleh ini, kami menggunakannya untuk pembelajaran dengan persamaan (3.36).

Adapun tahapan dari proses pelatihan untuk parameter adalah konversi citra RGB ke HSV, mengambil nilai saturasi dan kecerahan saja dari HSV, mengambil nilai intensitas dari peta kedalaman, memasukkan dan menjadikan satu nilai saturasi dan kecerahan ke dalam matriks \mathbf{X} , dan memasukkan nilai

intensitas peta kedalaman untuk tiap piksel ke dalam vektor \mathbf{y} . Tahap terakhir dari proses pembelajaran ini adalah memasukkan peubah yang telah diketahui ke dalam persamaan (3.36). Setelah keluaran dari nilai kedalaman $d(x)$ pada persamaan (3.36) telah diketahui, maka tahap selanjutnya adalah mencari nilai peta transmisi $t(x)$ seperti pada persamaan (3.13).

3.4 Pemulihan Citra

Tahap pemulihan citra adalah tahap terakhir dari proses reduksi kabut pada penelitian ini. Setelah nilai kedalaman $d(x)$ diketahui, peta transmisi $t(x)$ diketahui, dan nilai estimasi cahaya atmosfer \mathbf{A} juga diketahui, maka tahap selanjutnya adalah mencari $\mathbf{J}(x)$ dari persamaan (2.1). Untuk mencari nilai $\mathbf{J}(x)$, maka perlu dilakukan proses perubahan bentuk rumus dari persamaan (2.1), menjadi:

$$\mathbf{J}(x) = \frac{\mathbf{I}(x) - \mathbf{A}_c}{t(x)} + \mathbf{A}_c, \quad (3.37)$$

Perlu diketahui bahwa hasil dari estimasi peta transmisi ada kalanya nilai intensitasnya cenderung sangat kecil hingga mendekati nol (0). Jika hal ini diteruskan, maka pelemahan langsung $\mathbf{J}(x)t(x)$ akan juga cenderung mendekati nol. Tentunya, citra cerah $\mathbf{J}(x)$ akan mengandung *noise* [24]. Oleh karena itu, persamaan $t(x)$ diubah menjadi:

$$t_{en} = \begin{cases} t_l & t < t_l \\ t_m & t_l \leq t \leq t_h \\ t_h & t > t_h \end{cases}, \quad (3.38)$$

Di mana t_l adalah batas bawah dari nilai intensitas peta transmisi, t adalah nilai transmisi $t(x)$, t_h adalah batas atas nilai intensitas peta transmisi, dan t_{en} adalah nilai transmisi setelah proses filter pada persamaan (3.38). jika diturunkan kembali persamaan (3.37) dengan persamaan (3.38), maka dapat diperoleh:

$$\mathbf{J}(x) = \frac{\mathbf{I}(x) - \mathbf{A}_c}{t_{en}} + \mathbf{A}_c \quad 3.38$$

Untuk nilai minimum t_l , kami menentukan nilai tersebut dengan 0.1 dan nilai maksimal t_h sama dengan 0.9. Akhirnya, citra cerah $\mathbf{J}(x)$ bisa didapatkan dengan menggunakan persamaan (3.38).

3.5 Evaluasi Kontras

Salah satu permasalahan dari visibilitas pada cuaca buruk adalah ketiadaan cahaya atmosfer [35]. Pada keadaan tertentu, ketiadaan ini biasanya disebabkan karena mendung yang langit. Tan *et al* menyebutkan bahwa ada salah satu hal yang harus diperhatikan terkait reduksi kabut, yaitu citra keluaran harus memiliki kontras yang lebih tinggi citra kabut. Dengan melakukan evaluasi terhadap kontras, nilai dari perubahan kontras dari citra berkabut ke citra cerah bisa diketahui.

Pada bagian ini, terdapat tiga definisi untuk nilai kontras. Yang pertama kontras Weber, kontras Michelson, dan kontras *Meas-Squared Error* (MSE) [27], [55]. Kim *et al* mendefinisikan kontras untuk satu saluran warna.

3.5.1 Kontras *Mean Squared Error* (MSE)

Kontras MSE merepresentasikan besarnya varians dari nilai piksel [55]. Nilai kontras MSE K_{MSE} bisa diperoleh dari:

$$K_{MSE} = \sum_{i=0}^n \frac{(J_c(i) - \bar{J}_c)^2}{n} \quad (3.39)$$

di mana c adalah indeks dari saluran warna RGB, \bar{J}_c adalah nilai rata-rata dari $J_c(i)$, dan n adalah jumlah piksel dalam suatu blok.

3.5.2 Kontras Michelson

Kontras Michelson, $K_{michelson}$, biasakan digunakan untuk pola dan tekstur [55], [56]. Metode ini digunakan untuk mengukur perbedaan antara nilai maksimum dan nilai minimum intensitas suatu citra. Nilai $K_{michelson}$ ditentukan dengan:

$$K_{michelson} = \frac{L_{maks} - L_{mins}}{L_{maks} + L_{mins}} \quad (3.40)$$

di mana L_{maks} dan L_{mins} adalah nilai maksimum dan minimum dari luminans secara berurutan.

3.5.3 Kontras Weber

Kontras Weber, K_{weber} , didefinisikan dengan pengukuran perbedaan warna latar belakang citra dengan warna objek [27], [55]. Model matematis dari K_{weber} adalah:

$$K_{weber} = \frac{J_{obj} - J_{lb}}{J_{lb}} \quad (3.41)$$

di mana J_{obj} adalah nilai intensitas piksel pada objek, J_{lb} adalah nilai intensitas pada latar belakang. Kontras Weber ini sering digunakan sebagai model system penglihatan manusia. Namun, pada praktiknya, menurut Kim *et al* [27] setiap nilai piksel dianggap sebagai warna objek dan nilai rata-rata piksel dianggap sebagai warna latar belakang. Sehingga, persamaan (3.41) bisa diturunkan menjadi:

$$K_{weber} = \sum_{i=0}^n \frac{|J_c(i) - \bar{J}_c|}{n\bar{J}_c} \quad (3.42)$$

Persamaan kontras Weber (3.42) memiliki kemiripan dengan kontras MSE pada persamaan (3.39).

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi puncak gunung berapi Kelud sering diselimuti oleh kabut. Penyebabnya selain dari partikel uap air di udara yaitu sulfatara yang merupakan hasil reaksi gas kimia. Untuk penelitian ini, kami tidak membedakan asal kabut itu berasal baik dari sulfatara maupun uap air. Kami cukup menyebut gas-gas ini dengan kabut karena secara pengamatan visual keduanya belum memberikan perbedaan yang mendasar.

Dari waktu ke waktu, kondisi danau gunung Kelud sulit dipantau karena adanya kabut. Pada bagian ini, kami melakukan proses reduksi kabut dengan metode berbasis *dark channel prior* dan *color attenuation prior*. Adapun tahapan pertama dari proses percobaan kami adalah melakukan estimasi cahaya atmosfer berdasarkan informasi dari citra *dark channel*. Tahap kedua adalah melakukan estimasi untuk mencari parameter dari model kedalaman pada persamaan 3.15 dengan metode *Least-Squared Estimation*. Tahap ketiga kami melakukan estimasi peta transmisi dengan hasil dari estimasi kedalaman. Sedangkan untuk tahap terakhir kami melakukan proses pemulihan (*recovery*) citra.

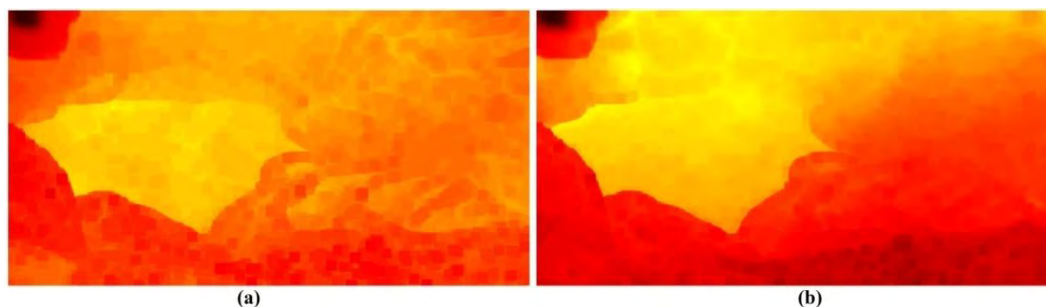
Untuk mengetahui apakah kabut sudah berkurang apa belum, kami melakukan evaluasi dengan mengukur nilai kontras dan nilai kecerahan dari citra yang ditangkap oleh kamera CCTV model Axis Q1755-E Network Camera yang berada di puncak gunung Kelud. Sedangkan untuk mengetahui korelasi antara saturasi dan kecerahan, kami mengevaluasi dengan membandingkan intensitas kecerahan dan saturasi dari suatu citra.

4.1 Estimasi Cahaya Atmosfer dari *Dark Channel Prior*

Pada citra pemandangan luar ruangan, sering kita menjumpai proporsi dari latar cukup bagus. Mata manusia dengan mudah bisa membedakan antara langit dan daratan. Umumnya, area langit bisa berfungsi sebagai sumber cahaya. Cahaya matahari yang berpropagasi melalui atmosfer kemudian bertumbukan partikel-partikel air di udara, maka cahaya akan dipencarkan. Efek dari sebaran cahaya ini menjadikan awan seolah-olah memancarkan cahaya.

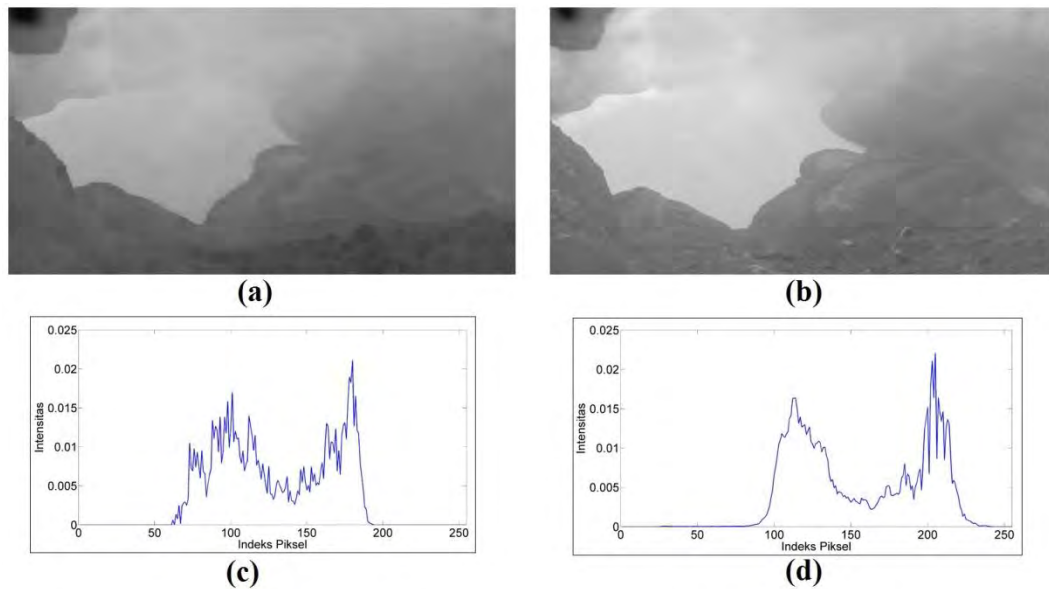
Sumber cahaya sekunder selain cahaya matahari misalnya objek yang memantulkan cahaya matahari, seperti: permukaan laut, permukaan danau, atau cermin. Bidang pandang dari kamera pemantau di gunung Kelud saat ini tidak mencakup area langit. Permukaan danau kawah Kelud kadang memantulkan cahaya matahari ketika saat cuaca tidak mendung. Sehingga, pantulan cahaya matahari ini pada permukaan kawah diasumsikan sebagai sumber cahaya tidak langsung. Hal ini bisa dibuktikan dengan menggunakan metode *dark channel prior*.

Beberapa piksel dengan intensitas tinggi sebanyak 0.1 persen diambil dari citra *dark channel*. Pembuatan citra *dark channel* ini dimulai dengan membuat sebuah jendela blok berukuran 15 x 15 piksel. Kemudian, dari jendela blok ini diambil intensitas terendah dari salah satu saluran warna RGB. Dari perhitungan minimum ini, dihasilkan jendela blok baru berukuran 15 x 15 dengan intensitas yang sama dengan nilai intensitas terendah salah satu saluran yang diambil untuk perhitungan sebelumnya. Dari hasil pengolahan ini, maka didapat citra *dark channel*. Piksel yang berjumlah 0.1 persen dari total piksel *dark channel* dengan intensitas tinggi ini bisa diasumsikan sebagai sumber cahaya. Hal ini bisa dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Citra *dark channel* dari kawah gunung berapi Kelud. Intensitas tertinggi cenderung berada pada area kawah

Pada Gambar 4.1(a), intensitas tertinggi berada pada area kawah. Warna kekuningan menunjukkan nilai intensitasnya. Semakin cerah warna kuning, maka akan semakin besar nilai intensitasnya. Sedangkan Gambar 4.1 (b), intensitas tertinggi selain didominasi oleh kawah, kabut tebal yang menyelimuti di atas kawah juga mendominasi.



Gambar 4.2. Perbandingan citra *grayscale* dengan citra *dark channel*. (a) adalah citra *dark channel* dengan (c) sebagai bentuk histogramnya. Demikian pula (b) adalah citra *grayscale* dan (d) sebagai histogramnya.

Perbedaan citra *dark channel* dengan citra *grayscale* terletak pada proses konversinya. Citra *grayscale* menghitung nilai rata-rata intensitas piksel dengan cara menjumlahkan tiga saluran RGB kemudian dibagi tiga. Sedangkan citra *dark channel* menggunakan operator minimum untuk pemrosesan per jendela blok. Pada Gambar 4.2(c) dan Gambar 4.2(d) menunjukkan perbedaan histogram antara citra *grayscale* dan *dark channel*. Nilai estimasi cahaya atmosfer **A** adalah vektor dengan ukuran 1×3 yang mewakili intensitas tertinggi saluran RGB.

Tabel 4.1. Daftar Nilai Intensitas **A** dalam beragam kondisi kawah.

Nomor Citra	A_1	A_2	A_3
#1	0.75128	0.76097	0.74846
#2	0.99873	0.96077	0.78313
#3	0.76297	0.76868	0.71044
#4	0.83335	0.87644	0.88473
#5	0.7699	0.81151	0.82011
#6	0.74693	0.78786	0.77535
#7	0.69474	0.73522	0.72193
#8	0.73961	0.78438	0.80799
#9	0.8556	0.87687	0.71123
#10	0.71322	0.76125	0.75643
μ	0.786633	0.812395	0.77198

Pada Tabel 4.1, terdapat tiga kolom A_1 , A_2 dan A_3 . Masing-masing dari kolom ini mewakili saluran warna R, G, dan B secara berurutan. Dari nilai-nilai ini merupakan hasil penjumlahan nilai intensitas tertinggi kemudian dibagi dengan jumlah piksel tertinggi tersebut untuk tiap saluran RGB. Secara umum nilai dari cahaya atmosfer untuk masing-masing citra rata-rata sebesar 0.786633, 0.812395, dan 0.77198 untuk tiap saluran. Pada citra nomor #2, terdapat perbedaan yang lebih menonjol dibanding saluran R dan G pada citra yang lain sebesar 0.99873 dan 0.96077. Sedangkan untuk intensitas paling rendah ada pada citra nomor #7.

4.2 Estimasi Parameter Model Kedalaman

Menurut [34], [35], kedalaman dari setiap piksel merepresentasikan jarak dari latar. Sangat sulit menentukan kedalaman dari citra luar ruangan dengan satu kamera. Oleh karena itu, diperlukan proses pendekatan berupa estimasi untuk mengetahui kedalaman dari suatu citra luar ruangan.

Untuk mencari nilai kedalaman citra berdasarkan model kedalaman pada persamaan (3.15), maka diperlukan estimasi parameter koefisien dari λ_1 , λ_2 , dan λ_3 . Dalam proses estimasi ini kami menggunakan metode LSE dikarenakan adanya korelasi secara positif antara kedalaman dan saturasi dari citra luar ruangan. Kami mengambil data citra luar ruangan dari penelitian sebelumnya yaitu peta kedalaman dan citra cerah kota New York dari [54].

Ada beberapa tahap dalam proses estimasi koefisien yang kami lakukan. Pertama, melakukan konversi citra RGB ke dalam bentuk ruang warna HSV. Dari ruang warna HSV ini, kami hanya mengambil saluran *saturation* dan saluran *value*. Cara menghitung nilai saturasi dari warna RGB adalah mencari nilai selisih dari nilai intensitas terbesar dan terkecil dari masing-masing saluran RGB. Kemudian, dari selisih ini dibagi dengan nilai maksimum intensitas salah satu saluran RGB. Sedangkan nilai *value* diambil dari nilai maksimum intensitas RGB tiap piksel.

Kedua, kami mengambil citra kedalaman dari peta transmisi. Dari 12 buah citra ditambah dengan masing-masing peta transmisi, kami melakukan konversi peta kedalaman dengan persamaan (2.3) dan citra model RGB kota New

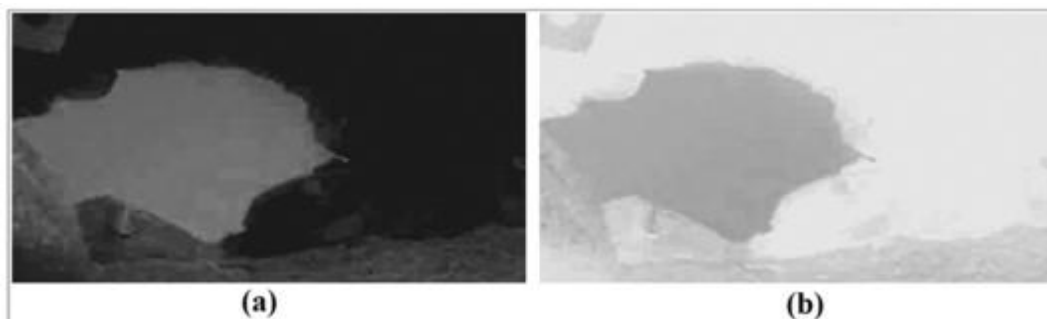
York berukuran 720 x 480. Berarti, ada sekitar 345.600 data saturasi, 345.600 data *value*, dan beserta model kedalamannya sebanyak 345.600 data.

Ketiga, setelah mendapatkan data citra kedalaman, saturasi, dan *value*, kami mengubah ketiga bentuk data ini ke dalam vektor. Kemudian, dengan menggunakan persamaan (3.34) dan (3.35), kami melakukan proses pelatihan untuk mendapatkan nilai estimasi koefisien dari parameter yaitu $\lambda_1 = -0.4595$, $\lambda_2 = 0.6651$ dan $\lambda_3 = 1.3912$. Selanjutnya, kami melakukan rekonstruksi peta transmisi dan kedalaman dengan data citra gunung Kelud menggunakan persamaan (3.15).

4.3 Estimasi Peta Transmisi

Hasil dari proses rekonstruksi citra kedalaman dan peta transmisi menggunakan persamaan (3.15) dan parameter koefisien model kedalaman jika dilihat secara sepintas adalah kebalikan satu sama lain. Namun, jika merujuk persamaan (2.3), perbedaan dari peta kedalaman dan peta transmisi bisa dilihat pada Gambar 4.3.

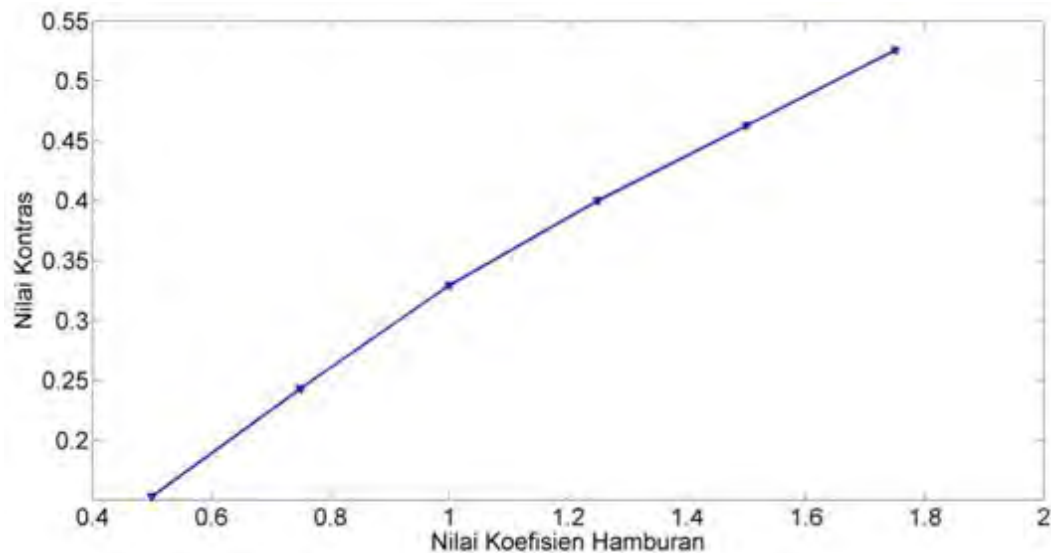
Jika melihat kembali persamaan (3.13), besarnya nilai transmisi selain dipengaruhi oleh kedalaman juga dipengaruhi oleh besarnya nilai koefisien hamburan β . Untuk kondisi cuaca yang cerah, koefisien cenderung homogen. Sedangkan untuk kondisi berkabut, apalagi bercampur dengan asap, tentunya koefisien ini tidak homogen. Untuk mengetahui hasil peta transmisi, kami menerapkan hasil estimasi parameter koefisien pada model kedalaman dengan berbagai nilai dari koefisien hamburan β .



Gambar 4.3. Perbedaan citra rekonstruksi peta kedalaman (a) dan peta transmisi (b)

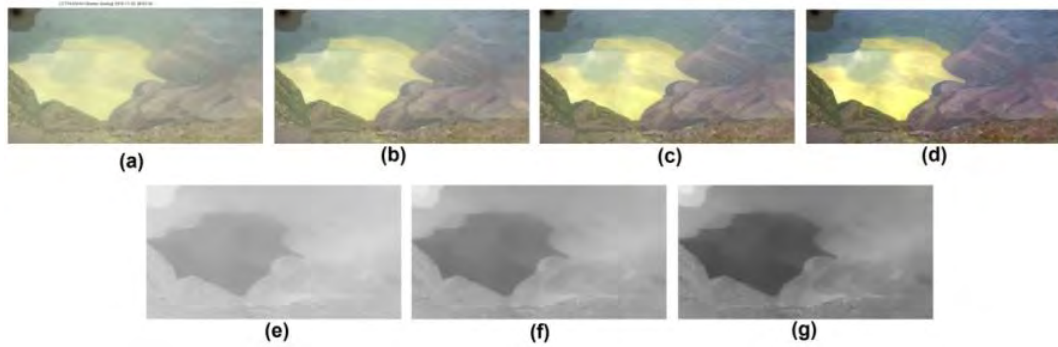
Dalam proses estimasi peta transmisi t , kami memberikan batas bawah dan batas atas untuk nilai hasil estimasi t . Kami membatasi nilai t agar nilai intensitas t tidak kurang dari 0.1 atau lebih dari 0.95. Jika nilai $t < 0.1$, maka hasil intensitas akan cenderung mendekati 0 dan sebaliknya. Selain itu, pembatasan ini bertujuan agar nilai t tetap berada antara 0 dan 1 [24], [31], [57].

Beragam besaran nilai koefisien hamburan β di atmosfer juga mempengaruhi nilai dari peta transmisi. Semakin besar nilai β maka semakin besar nilai kontras. Dan sebaliknya, semakin kecil nilai β maka semakin rendah nilai kontras. Korelasi antara kontras dan nilai β bisa dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4. Grafik korelasi antara nilai koefisien hamburan β dengan nilai kontras peta transmisi

Tentunya, nilai peta transmisi akan mempengaruhi proses terakhir yaitu pemulihan (*recovery*) citra. Besarnya nilai β dan nilai peta kedalaman d akan menentukan kualitas citra yang dipulihkan. Sebagai catatan bahwa koefisien hamburan β , yang mana dianggap konstan [33] pada region yang homogen, merepresentasikan kemampuan satuan volume di atmosfer untuk menyebarkan



Gambar 4.5. Citra kabut dan peta transmisi terkait perubahan koefisien β . (a),(b),(c),(d), adalah citra asli, citra hasil *dehazing* $\beta = 0.75, \beta = 1.0, \beta = 1.25$, (e),(f), dan (g) adalah peta transmisi dengan $\beta = 0.75, \beta = 1.0, \beta = 1.25$

cahaya ke segala arah. Dengan kata lain, β menentukan intensitas dari *dehazing* secara langsung sebagai mana diilustrasikan pada Gambar 4.5. Pada Gambar 4.5 (e)-(g) menunjukkan estimasi peta transmisi dengan nilai β yang berbeda, dan Gambar 4.5 (b)-(d) menunjukkan hasil proses *dehazing*. Sebagaimana yang tampak, di sisi lain, kecilnya nilai β cenderung akan menjadikan peta transmisi lebih kecil, dan hasil pemulihan citra terkait masih terisi oleh kabut untuk jarak yang jauh sebagaimana yang tampak pada Gambar 4.5 (b) dan Gambar 4.5 (e). Di sisi lain, nilai β yang terlalu besar bisa menyebabkan overestimasi oleh transmisi sebagaimana yang tampak pada Gambar 4.5 (d) dan Gambar 4.5(g). Oleh karena itu, nilai β yang sedang diperlukan untuk mengatasi citra dengan kabut yang padat. Pada sebagian besar kasus, nilai $\beta = 1.0$ lebih dari cukup.

4.4 Proses Pemulihan Citra

Tujuan akhir dari metode yang diusulkan ini adalah pemulihan citra (*scene radiance recovery*). Karena kita memiliki cahaya atmosfer dan peta transmisi, maka citra latar dipulihkan menggunakan persamaan (3.38). Pada bagian ini, metode yang diusulkan disimulasikan bersama dengan algoritma sebelumnya, yaitu He *et al* untuk DCP[24], Gao *et al*[30] dengan metode *negative correction* (NC), dan Zhu *et al* untuk CAP [21], dan Chen *et al*[58] dengan metode *high gain intervention refinement* (HGIR).

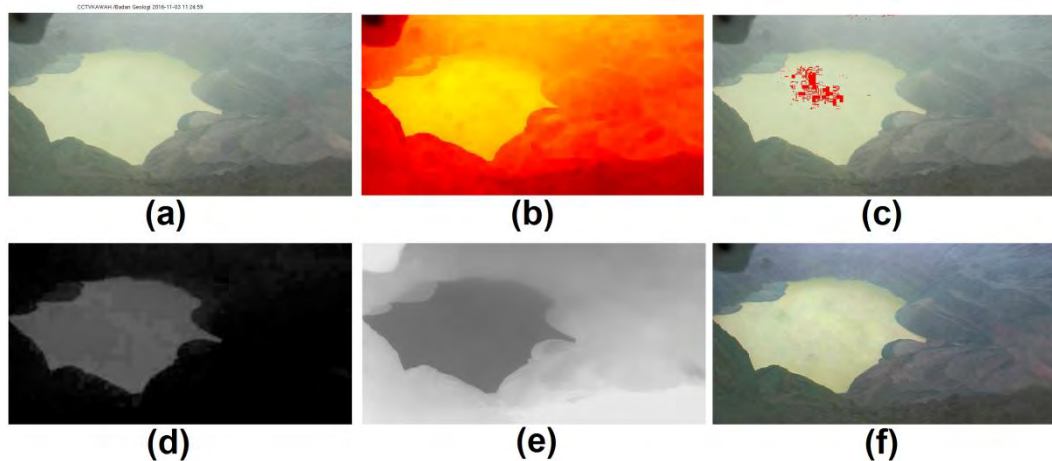
Sebelum melakukan perbandingan dengan metode lain, hasil dari tiap-tiap tahapan metode dibahas secara rinci. Pada tahap estimasi cahaya atmosfer

nilai dari keluaran sudah diperoleh. Jika dilihat pada Gambar 4.5, lokasi cahaya atmosfer ditentukan dengan piksel-piksel blok yang ditandai dengan warna merah. Pewarnaan ini dilakukan dengan mengubah piksel-piksel yang ditemukan dan dianggap sebagai cahaya atmosfer. Setiap piksel dilakukan iterasi kemudian membandingkan tiap piksel dari cahaya atmosfer dengan piksel dari citra kabut. Selanjutnya, jika ditemukan kesamaan piksel koordinatnya, maka saluran merah dari RGB diubah dengan nilai 1 dan dua saluran lainnya diubah menjadi 0 sehingga akan memunculkan warna merah murni sebagaimana yang tampak pada Gambar 4.5 (c).

Kemudian, nilai kedalaman d untuk model kedalaman juga sudah diketahui setelah melakukan pelatihan dengan beragam citra kedalaman luar ruangan. Dari hasil kedalaman ini, nilai peta kedalaman t juga sudah didapat. Langkah terakhir adalah melakukan proses *dehazing* sebagaimana yang tampak pada Gambar 4.5.

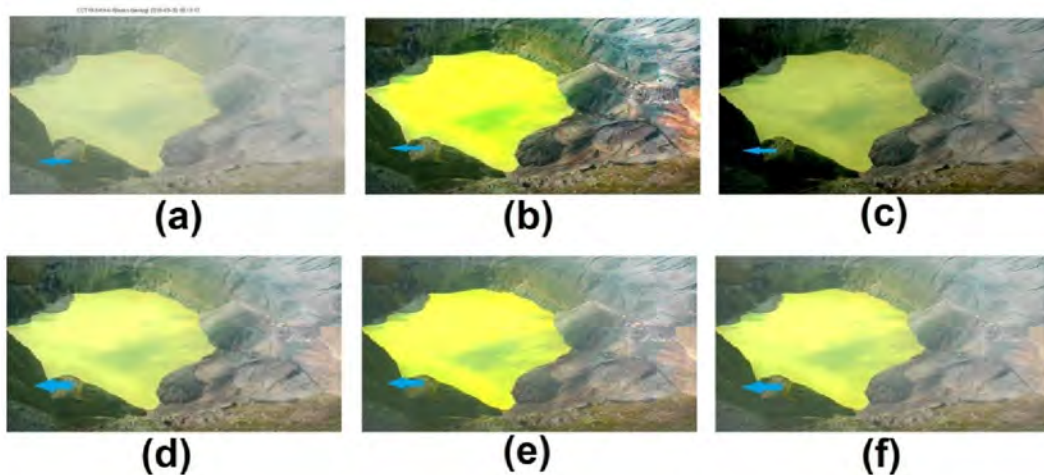
Citra yang bebas dari kabut harus memiliki persyaratan tertentu. Diantaranya adalah konsistensi warna dan seminimal mungkin mengandung artefak seperti blok dan efek halo. Citra dari berbagai macam kondisi dibandingkan dengan masing-masing algoritma *dehazing*.

Citra kabut kawah dibandingkan dengan algoritma *dehazing* terlihat pada Gambar 4.6. Dalam hasil DCP, mampu mengembalikan kabut tebal pada citra kawah. Kontras citra kawah jauh meningkat. Tidak banyak efek halo yang ditunjukkan dalam data ini. Namun, hasil dari DCP mengalami oversaturasi sebagaimana yang tampak pada Gambar 4.6 (b). Intensitas warna kawah cenderung lebih dominan dibandingkan warna sekitarnya.

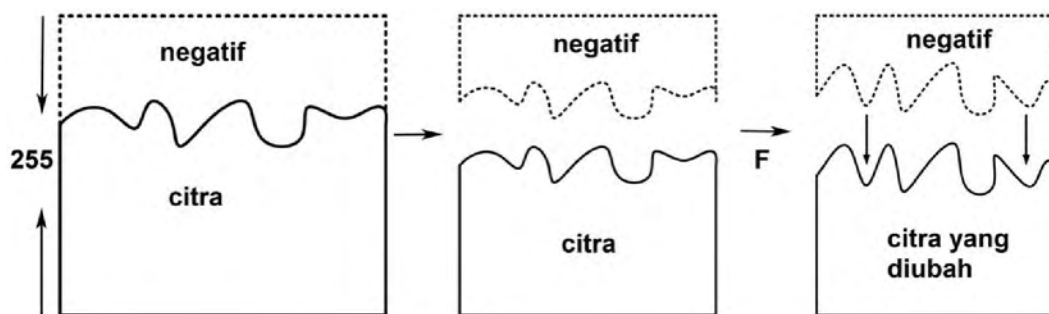


Gambar 4.6. Proses *dehazing* bertahap. Dimulai dari citra masukan (a), kemudian diproses dengan *dark channeling* (b), estimasi cahaya atmosfer (c), peta kedalaman (d), peta transmisi (e), dan citra keluaran (f).

Metode NC yang dibawakan oleh Gao *et al*[30] bisa mengurangi kabut. Inti dari algoritma NC adalah mengubah intensitas tiap-tiap piksel pada citra negatif. Sebagaimana pada Gambar 4.7, garis padat mewakili gambar kabut asli dan gambar yang disempurnakan, dan atribut negatifnya diwakili oleh garis putus-putus. Dengan menggunakan transformasi gamma, linier, dan logaritmik nilai kecerahan dari citra negatif bisa dinaikkan sebesar F . Dari sudut pandang intuitif, meningkatkan kecerahan negatif dengan transformasi linier sama dengan menghilangkan persentase negatif dari citra asli. Semakin tinggi kecerahan gambar asli, semakin rendah kecerahan negatifnya; Jadi proses ini bisa memperluas selisih nilai kecerahan citra dan bisa memperbaiki kontras. Serupa dengan kontras, dari perspektif piksel tunggal, semakin tinggi nilai saluran citra asli, nilai saluran RGB akan semakin rendah. Sebagai hasilnya, proses ini dapat meningkatkan saturasi.



Gambar 4.7. Citra kabut kawah pada kondisi kabut tidak terlalu tebal dengan hasil *dehazing* (b)-(f) dengan metode DCP (b), NC (c), CAP (d), (e) HGIR, dan (f) hasil kami.



Gambar 4.8. Proses *dehazing* dengan metode NC (*negative correction*).

Pada metode HGIR sebagaimana yang tampak pada Gambar 4.6 (e), warna kawah mengalami oversaturasi seperti halnya metode DCP. Algoritma yang diusulkan dan hasil CAP tampak serupa. Seperti ditunjukkan pada Gambar 4.6 (d) dan (f), metode yang diusulkan mampu meningkatkan kontras warna untuk benda yang dekat. Untuk daratan sekitar danau, seperti bayangan yang ditunjukkan dengan panah warna biru, metode NC dan DCP cenderung lebih gelap dibandingkan dengan metode yang lain. Dalam metode yang diusulkan, warna kawah tidak terlalu mengalami oversaturasi jika dibandingkan dengan DCP dan HGIR. Dari hasil ini, warna kawah terlihat alami.

Ketika citra kabut mengandung distorsi warna yang signifikan yang disebabkan oleh cuaca yang tidak normal seperti badai pasir [46], [52], hasil

estimasi cahaya atmosfer **A** menjadi jauh dari akromatis dan koreksi warna diperlukan untuk rekonstruksi citra setelah proses *dehazing*.

4.5 Analisis Perubahan Visibilitas dan Kontras

Setelah diketahui hasil dari estimasi cahaya atmosfer, estimasi peta kedalaman, dan estimasi peta transmisi maka langkah selanjutnya adalah melakukan proses pemulihan citra. Pada bagian ini, kami membandingkan hasil pemulihan citra dengan dua metode, yaitu metode berbasis murni *dark channel prior* dan metode kombinasi dengan *color attenuation prior*. Untuk menjawab rumusan masalah dari penelitian ini, kami membandingkan nilai perubahan kontras dan kecerahan.

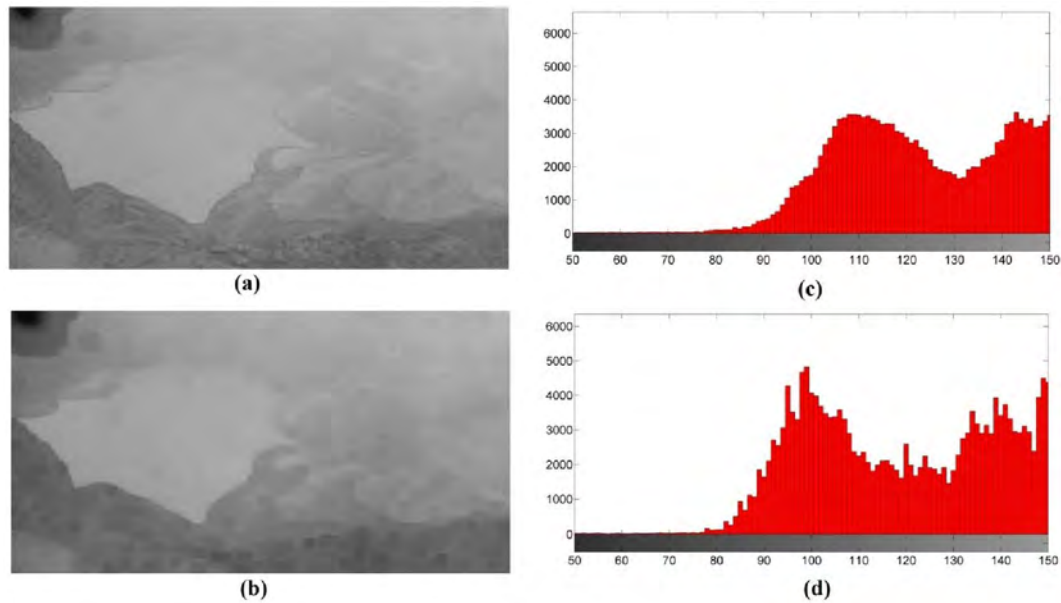
4.5.1 Perubahan Visibilitas

Kunci utama dari parameter proses estimasi transmisi t dari metode *dark channel prior* adalah ukuran dari jendela blok. Pada satu sisi, hasil *dark channel prior* lebih bagus ketika ukuran jendela blok lebih besar karena peluang dari sebuah jendela blok yang terdiri dari piksel gelap lebih besar. Semakin besar ukuran jendela blok, maka citra *dark channel* akan semakin gelap sebagaimana yang tampak pada Gambar 4.5. Persamaan (3.11) lebih akurat digunakan dengan ukuran jendela blok yang lebih besar. Jendela blok yang terlalu kecil akan menjadikan warna mengalami oversaturasi pada citra hasil pemulihan [24], [46]. Sedangkan asumsi yang mengatakan bahwa peta transmisi cenderung seragam untuk jendela blok menjadi kurang cocok jika ukuran jendela blok semakin membesar. Efek halo yang muncul di sekitar tepi semakin lebih kuat sebagaimana yang tampak pada Gambar 4.6.

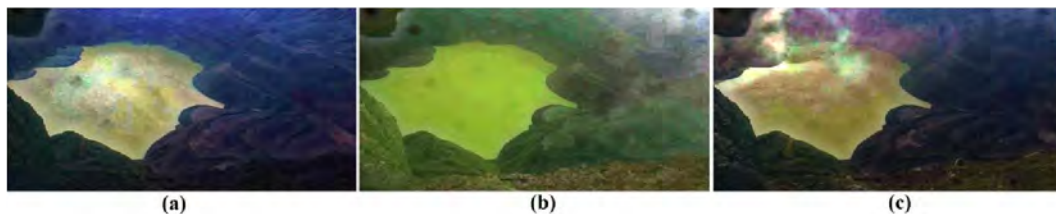
Gambar 4.6 menunjukkan hasil reduksi kabut dengan menggunakan *dark channel prior*. Citra yang kami gunakan berukuran 800 x 450. Namun, sebelum melakukan proses reduksi, kami membuang area label dari citra kawah sebesar 30 piksel dari atas citra.

Pada Gambar 4.11, dibandingkan hasil metode yang diajukan dengan metode CAP karena metode yang diajukan dibangun di atas asumsi yang sama dengan metode CAP. Hasil dari metode yang diajukan pun tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Perbedaan antara metode yang diajukan dengan

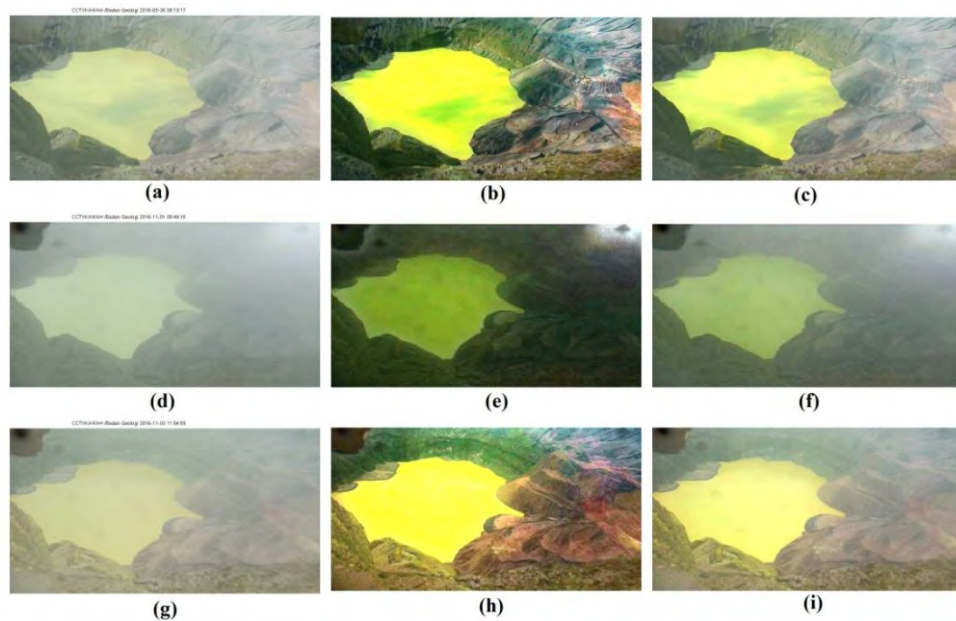
metode CAP jika dilihat dari hasil terletak pada ketebalan kabut yang dihasilkan. Salah satu penyebabnya adalah hasil nilai estimasi parameter koefisien dari model kedalaman yang berbeda sebagaimana yang nampak pada Gambar 4.11 (a), (d), dan (g) adalah citra asli berkabut. Hasil reduksi kabut dari DCP Gambar 4.11 (b), (e), dan (h). Hasil reduksi kabut dari CAP Gambar 4.11 (c), (f), dan (i).



Gambar 4.9. Citra *dark channel* dengan berbagai ukuran jendela blok. (a) jendela blok dengan ukuran 3x3 beserta histogramnya (c). (b) blok berukuran 15x15 dengan histogram (d).



Gambar 4.10. Hasil *dehazing* dengan estimasi peta transmisi menggunakan persamaan 3.11. Efek halo pada tepi kawah.



Gambar 4.11. Hasil reduksi kabut dengan metode DCP [24] dan CAP dari [21].(a),(d),(g) adalah citra asli, (b),(e),(h) adalah citra hasil DCP, (c),(f),(i) adalah citra hasil CAP

Untuk penelitian ini, kami menggunakan persamaan 3.13 untuk mencari nilai estimasi dari peta transmisi t sebagaimana yang tampak pada Gambar 4.7 (c), (f), dan (i). Kami juga membandingkan hasil t dengan beberapa koefisien β . Hampir setiap algoritma reduksi kabut asap mampu menghasilkan hasil yang bagus dengan menghilangkan kabut di gambar di luar ruangan. Tapi, sulit mengukurnya hanya dengan melihat. Dengan demikian, kita membandingkan algoritma sebelumnya [21], [24] pada cuaca yang berbeda dari gambar kabut dengan berbagai kerapatan kabut asap. Beberapa gambar berisi objek terang yang membuat metode DCP rentan terhadap oversaturasi sebagaimana yang tampak pada Gambar 4.7 (b) dan (h).

Kita dapat melihat bahwa Gambar 4.7 (b) dan Gambar 4.7 (c) memiliki kemampuan untuk menghilangkan kabut. Hasil dari DCP sebagaimana pada Gambar 4.7 (b) dan Gambar 4.7(h) cenderung mengalami oversaturasi karena warna danau lebih terang dari benda lainnya. Saat kabut semakin tebal, hasil dari DCP cenderung kebiru-biruan untuk tanah di sekitar danau karena warna biru kehijauan yang dominan. Untuk metode DCP, data yang kami gunakan menghasilkan efek halo di sekitar tepi danau seperti yang dapat kita lihat dengan

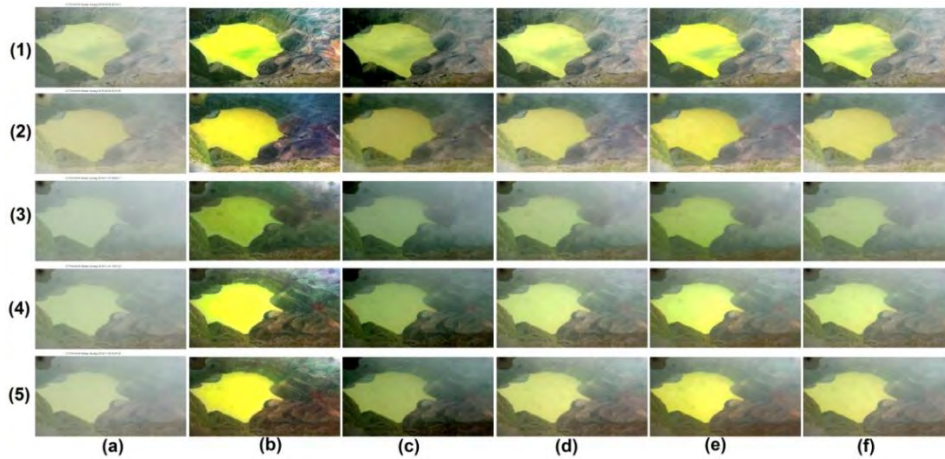
jelas pada Gambar 4.10 (a) dan Gambar 4.11 (e). Hal ini terjadi terutama disebabkan oleh blok artifak dari *dark channel* itu sendiri. Efek halo ini berkurang ketika seperti yang nampak pada Gambar 4.7 (c) dan Gambar 4.7(f). Ada sedikit bayangan, yang disebabkan oleh awan yang melintas di atas danau dan muncul sebagai refleksi pada permukaan air.

Ukuran dari jendela blok adalah parameter yang penting untuk rekonstruksi *dark channel*. Ukuran jendela blok yang terlalu kecil akan menyebabkan warna mengalami distorsi. Sedangkan jendela blok yang terlalu besar akan menyebabkan citra menjadi blur [46]. Demikian pula cahaya atmosfer, sangat diperlukan akurasi dari estimasi cahaya atmosfer. Pada kasus tertentu, ukuran jendela blok dibuat lebih besar hanya untuk menentukan cahaya atmosfer.

Hampir setiap algoritma reduksi kabut mampu mendapatkan hasil yang bagus. Akan tetapi, sangat sulit untuk mengetahui kualitas hanya melihat dari satu metode saja. Oleh karena itu, beberapa metode sebelumnya dibandingkan pada citra kabut kawah dengan beragam kondisi ketebalan kabut. Beberapa dari citra mengandung objek-objek yang cerah yang mana membuat sebagian besar algoritma reduksi kabut rentan akan oversaturasi.

Algoritma reduksi kabut yang *state-of-the-art* [21], [24], [30], [58] dibandingkan pada citra kawah gunung Kelud. Gambar 4.12 (a) adalah citra berkabut yang asli, Gambar 4.12 (b) adalah hasil dari metode DCP, Gambar 4.12(c) adalah hasil dari metode NC, Gambar 4.12 (d) adalah hasil dari metode CAP, Gambar 4.12 (e) adalah hasil dari metode HGIR, dan Gambar 4.12 adalah hasil dari metode kami.

Gambar 4.12 (b) dan Gambar 4.12 (e) menunjukkan kemampuan dari metode DCP dan HGIR untuk mengurangi kabut. Hasil dari DCP cenderung mengalami oversaturasi karena warna danau yang lebih cerah dibandingkan dengan objek lain. Ketika kabut mulai kelihatan menebal, hasil dari DCP cenderung lebih membiru untuk area sekitar danau sebagaimana yang nampak pada Gambar 4.12 (2)(b) dan Gambar 4.12 (3)(b).



Gambar 4.12. Citra hasil *dehazing* pada beragam kondisi. (a) adalah citra asli, (b) hasil DCP, (c) hasil NC, (d) hasil CAP, (e) hasil HGIR, dan (f) hasil PM

Pada hasil DCP juga menunjukkan adanya efek halo yang muncul pada area tepi danau kawah sebagaimana yang nampak pada Gambar 4.12 (3)(b). Hal ini disebabkan karena adanya jendela blok dari *dark channel* itu sendiri. Pada sebagian citra kawah, ada refleksi bayangan pada permukaan kawah. Kemungkinan besar ini disebabkan karena ada awan yang sedang berjalan melewati atas kawah kemudian menghalangi cahaya matahari.

Untuk metode NC, parameter koreksi citra negatif F ditentukan dengan nilai $F = 1.8$. Jika nilai F terlalu besar, maka citra akan menjadi lebih gelap. Sedangkan nilai F yang terlalu kecil, kabut hanya berkurang sedikit. Hasil dari NC tidak menimbulkan efek oversaturasi. Namun, citra hasil *dehazing* cenderung lebih redup dibandingkan dengan metode yang lain. Metode NC mampu menghilangkan kehilangan kabut sedikit dibandingkan yang lain. Pencahayaan luminans dari lingkungan sekitar tidak terlalu berpengaruh.

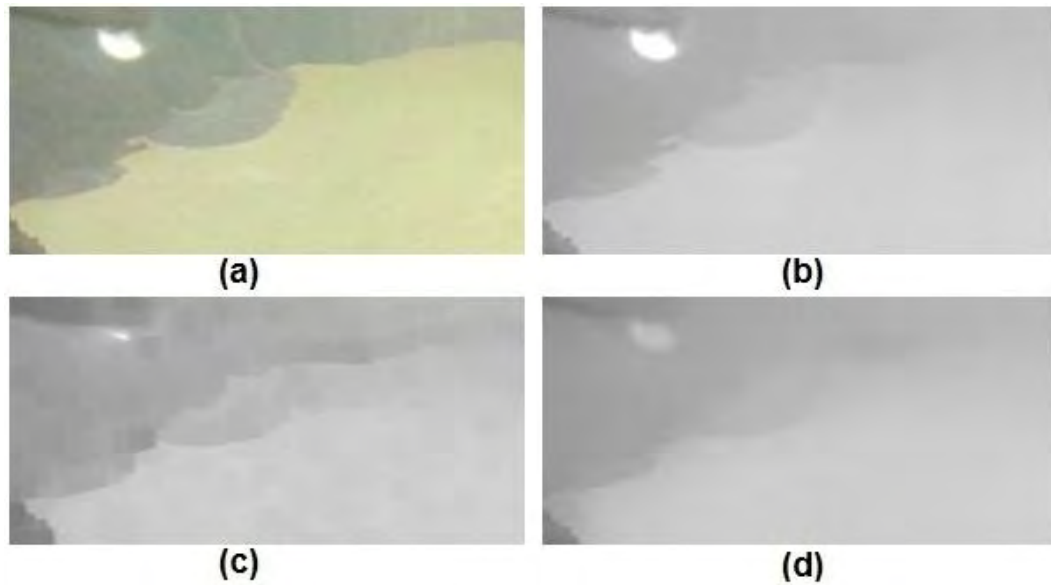
Dalam melakukan estimasi cahaya atmosfer, metode CAP mencari piksel-piksel dengan intensitas tinggi sebanyak 0.1 persen dari citra kedalaman. Berbeda dengan DCP yang mencari cahaya atmosfer dari citra *dark channel*. Perbedaan metode yang diajukan dengan metode CAP terletak pada metode estimasi peta kedalaman. Metode CAP menggunakan metode *maximum likelihood estimation* (MLE) sedangkan metode yang diajukan menggunakan *least-square estimation*. Proses pelatihan MLE dari Zhu *et al* menggunakan sampel data latih sebanyak 500 citra luar ruangan yang terdiri dari 120 juta titik. Untuk hasil yang

adil, parameter koefisien untuk estimasi kedalaman diambil dari makalah terkait [21] yaitu $\theta_0 = 0.121779, \theta_1 = 0.959710, \theta_2 = -0.780245$, dan $\sigma = 0.041337$.

Sebelum membandingkan antara metode yang diajukan dengan CAP, di sini akan di bahas terkait kelebihan dari CAP dibanding yang lain karena metode yang diajukan diadaptasi dari CAP. Metode CAP memiliki kecepatan pemrosesan paling tinggi dibanding yang lain [21]. Masalah umum yang dihadapi oleh beberapa metode sebelumnya, yang merupakan adaptasi dari DCP, adalah intensitas objek kecil dari latar yang berwarna putih. Objek putih ini jika menggunakan asumsi DCP akan dianggap sebagai sumber cahaya dikarenakan kecenderungan nilai saturasi yang rendah dan nilai kecerahan yang tinggi. Oleh karena itu, objek yang berwarna putih akan dianggap sebagai latar yang jauh. Namun, permasalahan ini diperbaiki dengan metode CAP di mana peta kedalaman di *patch* ulang dengan ukuran blok tertentu. Sebagaimana yang nampak pada Gambar 4.13, warna putih dari tetesan air yang menempel pada tudung moncong kamera berada atau dianggap sebagai region. Model dasar kedalaman dari CAP, yaitu persamaan (3.15), tidak bisa menangani objek ini. Kesalahan dalam estimasi kedalaman ini menjadikan titik air pada Gambar 4.13 (a) dianggap memiliki nilai kedalaman yang tinggi sebagaimana yang nampak pada Gambar 4.13 (b).

Untuk mengatasi masalah ini, piksel-piksel yang berdekatan dengan objek kecil putih diproses ulang. Pemrosesan ulang ini dilakukan dengan mencari peta kedalaman yang masih kasar, kemudian diambil nilai minimal dari piksel-piksel yang bertetanggaan dengan ukuran jendela blok 15 piksel.

Gambar 4.13 (d) menunjukkan hasil akhir dari peta kedalaman yang dipulihkan dengan *patch* ulang. Dengan proses ini, objek kecil putih dekat yang tadinya dianggap sebagai objek jauh sekarang dianggap sebagai objek dekat.



Gambar 4.13. Citra inputan berkabut diperbaiki untuk objek putih kecil. (a) citra kawah dengan tetesan air, (b) citra *dark channel*, (c) citra hasil *patch* ulang, (d) hasil setelah *patch*

4.5.2 Hasil Kontras dan Kecerahan

Beberapa hasil dari percobaan ini ditunjukkan pada Gambar 4.12 dan Gambar 4.7 antara metode DCP dengan metode CAP. Ketika citra kondisi berkabut, tingkat kontras akan rendah dan tingkat kecerahan akan berkurang bila dibandingkan dengan citra setelah dilakukan proses reduksi kabut. Selain mengurangi kabut, fungsi lain dari proses *dehazing* adalah memunculkan warna asli dari citra (*vivid color*). Hal ini berdasarkan pengamatan perubahan kontras yang ada dan visual dari citra yang dipulihkan.

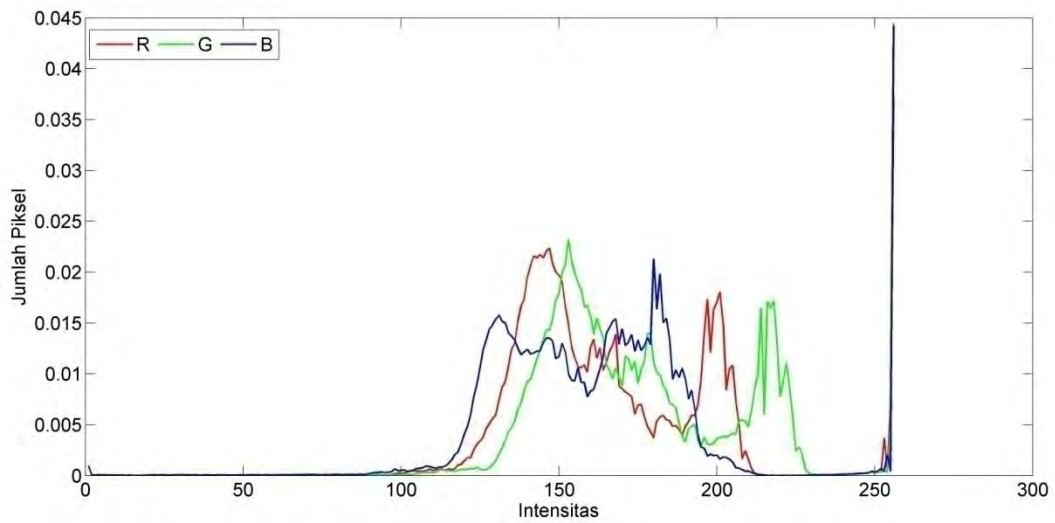
Data kontras dan kecerahan dibandingkan dari beberapa citra kawah gunung kelud yang sudah dilakukan *dehazing* dengan metode yang kami gunakan yaitu CAP berbasis DCP. Dari perbandingan ini, kami menemukan adanya perubahan nilai kontras dan kecerahan antara sebelum dan sesudah proses reduksi kabut. Untuk citra berkabut, nilai kontras cenderung rendah sedangkan nilai rata-rata kecerahan cenderung tinggi. Sedangkan citra hasil pemulihan memiliki tingkat kontras lebih tinggi dibanding citra kabut. Adapun rincian hasil perbandingan nilai kontras dan kecerahan bisa dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Tabel Perbandingan Nilai Kontras dan Kecerahan

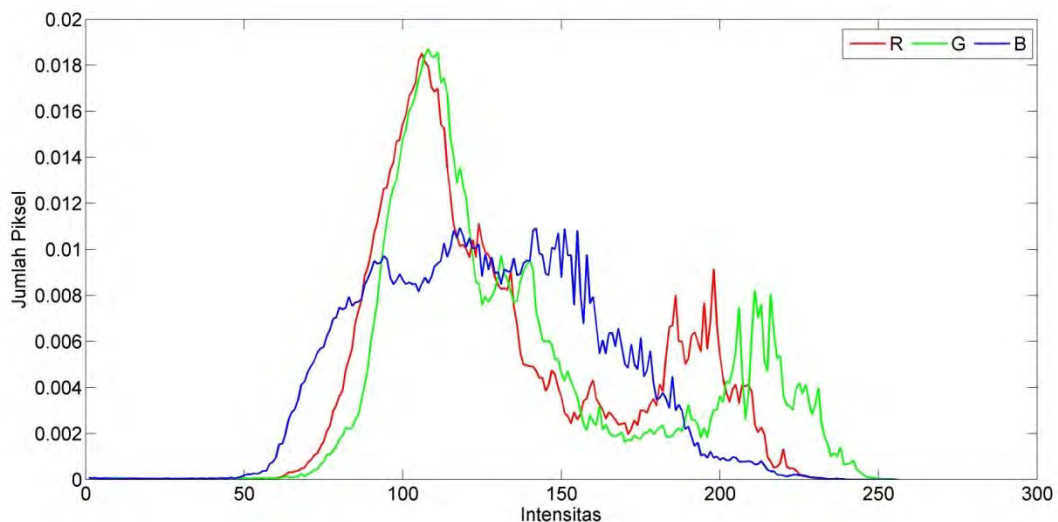
Nomor Citra	Nilai Kontras			Nilai Kecerahan		
	Sb_1	Sd_1	ΔK_1	Sb_2	Sd_2	ΔK_2
1	0.2717	0.4109	0.1392	0.6782	0.6618	-0.0164
2	0.2113	0.3397	0.1284	0.7126	0.5328	-0.1798
3	0.1678	0.2738	0.1060	0.6988	0.6734	-0.0254
4	0.2458	0.3295	0.0837	0.6728	0.5469	-0.1259
5	0.1825	0.2759	0.0934	0.7012	0.6252	-0.0760
6	0.2454	0.3275	0.0821	0.6676	0.5998	-0.0678
7	0.2315	0.3533	0.1218	0.6658	0.6440	-0.0218
8	0.2749	0.3535	0.0786	0.6756	0.6150	-0.0606
9	0.2199	0.3842	0.1643	0.6917	0.5978	-0.0939
10	0.2540	0.3735	0.1195	0.6575	0.6172	-0.0403
11	0.1949	0.3125	0.1176	0.6719	0.6183	-0.0536
12	0.3779	0.4272	0.0493	0.5986	0.5098	-0.0888
13	0.2089	0.3367	0.1278	0.6814	0.6959	0.0145
14	0.2496	0.3428	0.0932	0.6606	0.6161	-0.0445
15	0.3370	0.4491	0.1121	0.6258	0.5134	-0.1124
μ	0.244873	0.352673	0.1078	0.6707	0.6045	-0.0662

Di mana μ adalah nilai rata-rata, Sb_1 adalah nilai kontras sebelum *dehazing*, Sd_1 adalah nilai kontras setelah *dehazing*, ΔK_1 adalah selisih nilai kontras antara sesudah dan sebelum *dehazing*, Sb_2 adalah nilai kecerahan sebelum *dehazing*, Sd_2 adalah nilai kecerahan sesudah *dehazing*, dan ΔK_2 adalah nilai selisih kecerahan antara sesudah dan sebelum *dehazing*. Nilai kontras diukur dengan menggunakan metode Michelson [56]. Metode michelson ini menghitung nilai luminans dari citra. Yang dihitung adalah nilai maksimal dan minimal dari luminans. Nilai kontras bisa didapat dari persamaan 3.40.

Dari Tabel 4.2, nilai kontras untuk citra dengan latar berkabut cenderung lebih rendah bila dibanding dengan citra setelah dipulihkan. Nilai kontras mengalami kenaikan setelah dilakukan *dehazing*. Kenaikan ini bisa diketahui dari besarnya nilai selisih antara sesudah dan sebelum. Jika nilai selisih ini positif, maka nilai kontras naik. Jika nilai selisih negatif, maka nilai kontras cenderung turun. Secara umum, dari data kami, nilai kontras citra setelah *dehazing* akan naik rata-rata sebesar 0.1078.



Gambar 4.14. Grafik histogram dari kondisi citra dengan kondisi kabut sedang sebelum direduksi kabutnya.



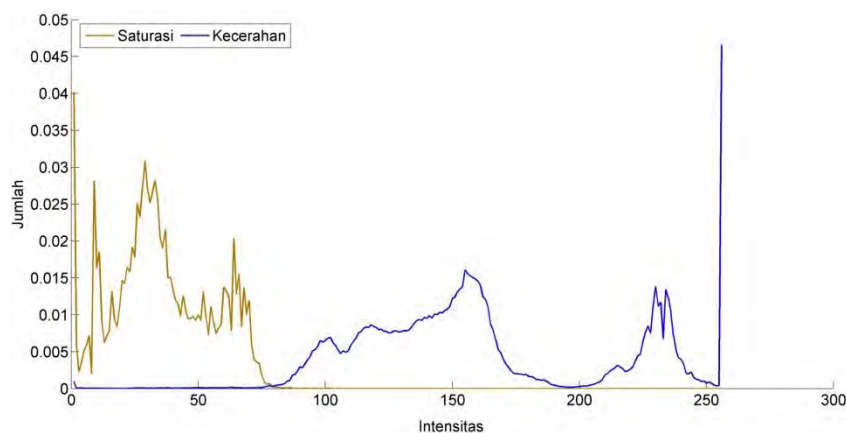
Gambar 4.15. Grafik histogram dari kondisi citra dengan kondisi kabut sedang sesudah direduksi kabutnya.

Data kawah diambil dari pukul 05.11 WIB hingga pukul 17.28 WIB. Citra kawah diambil setiap 5 menit. Sehingga, ada total sekitar 140 citra kawah Kelud. Data pada Gambar 4.14 diambil data histogramnya untuk citra RGB sebelum direduksi dengan kondisi kabut sedang. Histogram ini bertujuan untuk melihat perubahan kontras antara sebelum dan sesudah reduksi dengan kondisi kabut sedang.

Dalam kondisi berkabut, intensitas ketiga saluran warna RGB cenderung tinggi. Pada Gambar 4.14, intensitas histogram ketiga saluran warna cenderung

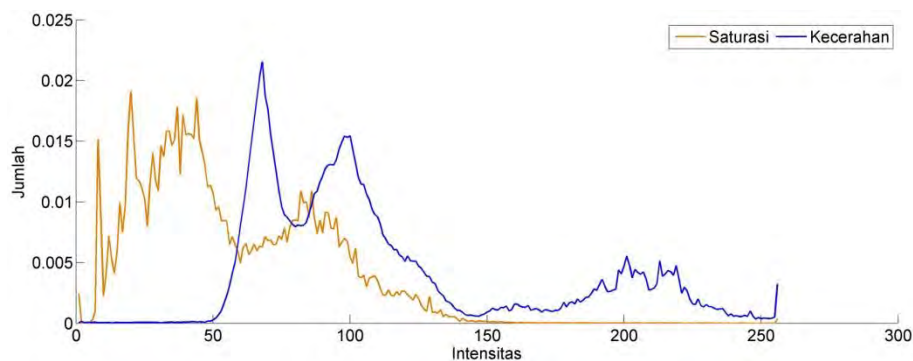
lebih banyak yang berada pada intensitas tinggi, yaitu hampir mendekati 255. Hal ini dikarenakan banyaknya kabut yang ada pada citra sebelum reduksi.

Perbedaan nilai kontras antara metode yang diusulkan dibandingkan dengan metode CAP dan DCP. Di mana metode yang diusulkan dibangun di atas metode DCP dan CAP. Hasil DCP memang lebih besar kenaikan nilai kontrasnya dibanding dengan metode CAP dan metode yang diusulkan. Namun, metode CAP tidak menghasilkan efek oversaturasi bila dibandingkan dengan DCP sebagaimana yang tampak pada Gambar 4.11 (b),(e), dan (h).

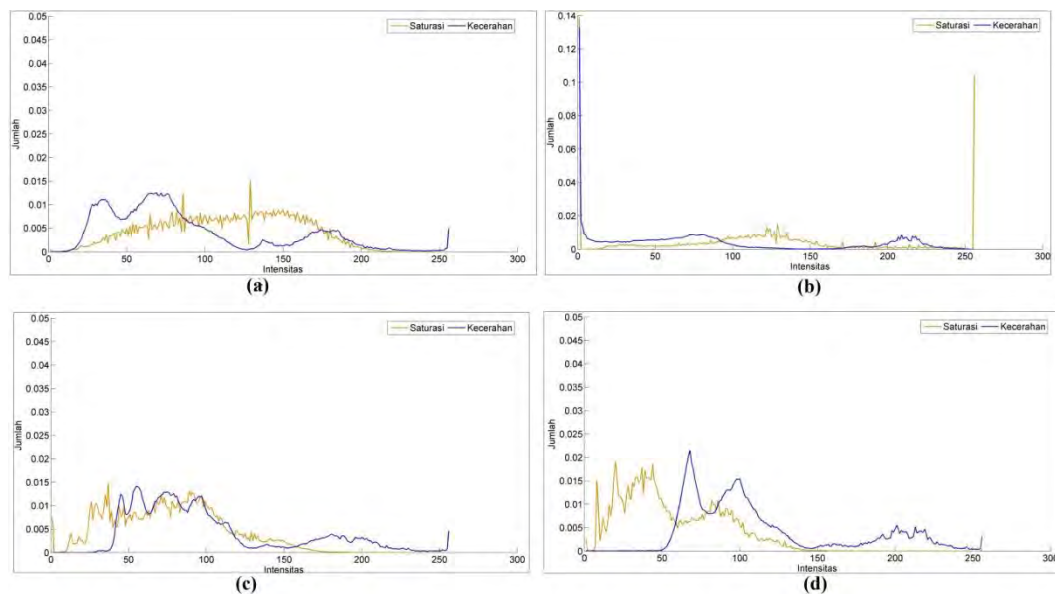


Gambar 4.16. Histogram dari saturasi dan kecerahan untuk citra dengan kondisi kabut sedang sebelum direduksi.

Pada saat citra dalam kondisi berkabut, nilai saturasi cenderung rendah dan sedangkan nilai kecerahan cenderung tinggi. Hal ini bisa dilihat pada Gambar 4.16. Pola dari data histogram saturasi cenderung lebih ke arah kiri. Sedangkan pola dari data histogram kecerahan lebih ke arah kanan. Bahkan, nilai saturasi yang hampir mendekati nol (0), cenderung banyak. Demikian pula untuk jumlah kecerahan yang berintensitas tinggi juga cenderung banyak.



Gambar 4.17. Histogram HSV citra setelah kabut direduksi.



Gambar 4.18. Histogram dari citra dengan kabut yang telah direduksi. (a) adalah metode DCP, (b) adalah metode NC, (c) adalah metode HGIR, dan (d) adalah metode yang diajukan PM.

Sedangkan setelah dilakukan reduksi kabut, perubahan yang signifikan terjadi pada kedua nilai, yaitu saturasi dan kecerahan sebagaimana dalam Gambar 4.17. Sebaran data saturasi mulai bergeser ke kanan jika dibandingkan data sebelum reduksi. Hal ini menandakan adanya kenaikan intensitas dari saturasi tersebut. Demikian pula untuk data kecerahan, sebaran datanya mulai bergeser ke arah kiri. Artinya, nilai intensitas kecerahan semakin menurun.

Meskipun dari sisi visual metode NC cenderung lebih redup, tetapi metode ini mendapatkan posisi nilai kontras paling tinggi dibandingkan metode PM dan HGIR. Distribusi dari data saturasi metode DCP cenderung mendekati normal sebagaimana pada Gambar 4.18 (a). Sedangkan pada metode NC, ditemukan *peak* atau puncak untuk distribusi saturasi pada intensitas mendekati maksimal sebagaimana pada Gambar 4.18 (b). Hal ini terjadi karena metode NC ini menaikkan masing-masing nilai intensitas dari citra negatifnya sebesar 1.8. Pola distribusi dari metode HGIR dengan PM hampir mirip. Namun, distribusi kecerahan dari metode PM lebih ke arah kiri bila dibanding dengan HGIR. Artinya, nilai kecerahannya metode PM lebih rendah dari HGIR.



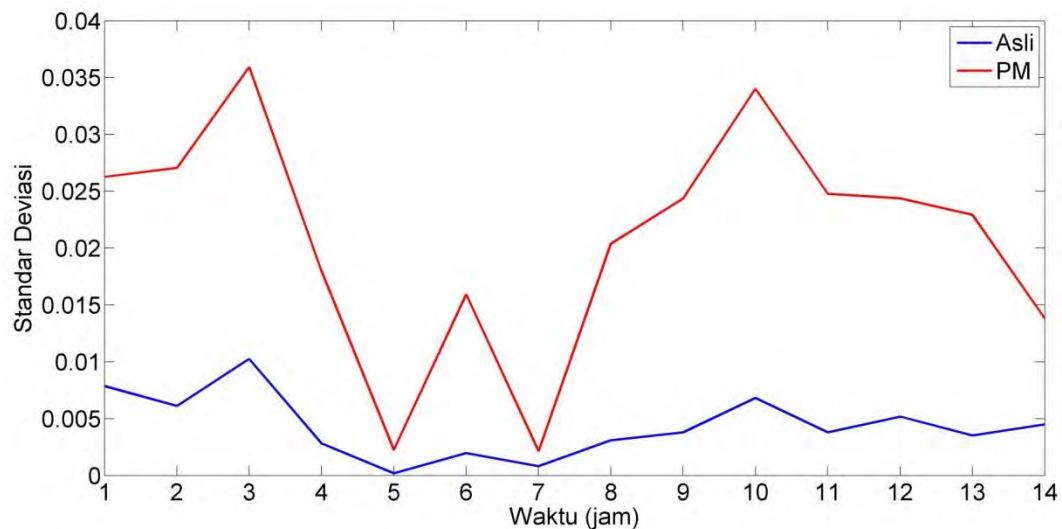
Gambar 4.19. Kabut tebal dari citra kawah. (a) kabut tebal yang terjadi pukul 09.36 WIB dan (b) kabut tebal yang terjadi pukul 16.13 WIB

Adapun hasil pengukuran tingkat kecerahan, pada citra dengan latar berkabut memiliki kecenderungan lebih tinggi jika dibandingkan dengan citra setelah dikurangi kabutnya. Perubahan ini bisa dilihat pada Tabel 4.2 bahwa besarnya nilai kecerahan berkurang rata-rata sebesar 0.0662. Tanda minus menunjukkan adanya penurunan nilai kecerahan. Nilai positif menunjukkan adanya kenaikan nilai kecerahan. Namun, ada citra yang ketika telah dilakukan proses reduksi kabut justru mengalami kenaikan nilai kecerahan sebagaimana citra pada nomor 13 Tabel 4.2.

Jika dilihat dengan nilai standar deviasi, citra setelah *dehazing* mengalami kenaikan nilai standar deviasi. Dari waktu ke waktu, nilai ini mengalami kenaikan drastis karena terjadi penebalan kabut. Pada jam tertentu nilai standar deviasi kembali naik dikarenakan kabut sudah berkurang sebagaimana yang bisa dilihat pada Gambar 4.20. Jika dihitung nilai rata-rata dari standar deviasi untuk citra kabut yang muncul maka akan didapatkan nilai standar deviasi sebesar 0.004117. Sedangkan citra setelah *dehazing*, nilai rata-rata dari standar deviasi adalah sebesar 0.018142857. Sehingga, nilai rata-rata perubahan standar deviasi antara citra berkabut dengan citra setelah *dehazing* mengalami kenaikan sebesar 0.014025714.

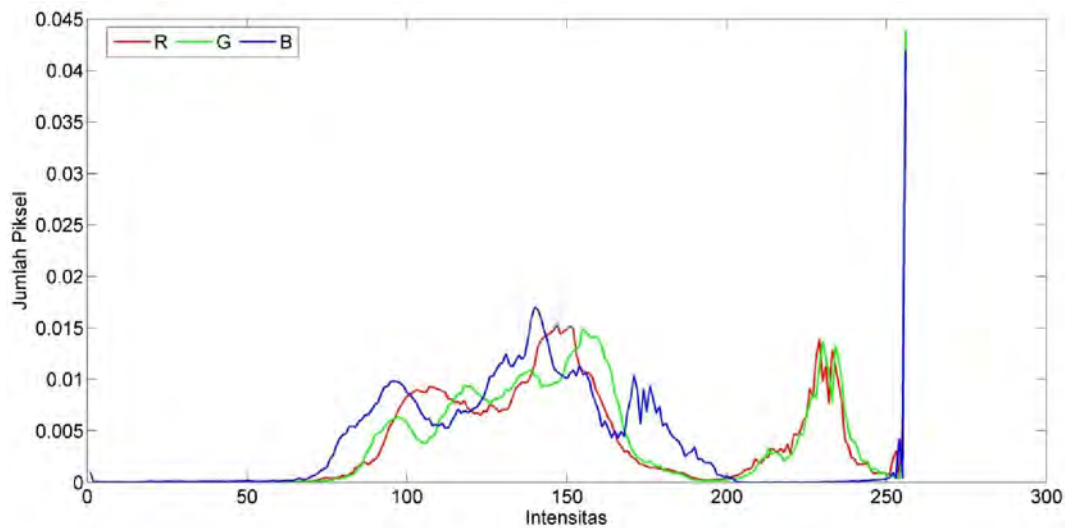
Nilai kontras dari algoritma sebelumnya juga dibandingkan dalam penelitian ini. Untuk pengukuran kecerahan sebagai pembanding dengan metode-metode sebelumnya, 140 citra kawah diambil untuk diukur nilai kecerahannya pada masing-masing algoritma sebagaimana yang tampak pada Gambar 4.21 dan Gambar 4.22. Pada Gambar 4.21 dan Gambar 4.22, warna biru mewakili tingkat kecerahan pada citra asli, sedangkan warna biru muda mewakili metode yang

diajukan (PM). Warna hijau pada Gambar 4.21 adalah tingkat kecerahan dari metode DCP dan warna merah adalah hasil dari metode CAP. Hasil dari nilai kecerahan pada metode PM dan CAP cenderung sama karena metode PM dibangun dengan asumsi yang sama dengan metode CAP. Metode DCP memiliki intensitas kecerahan yang paling rendah dibandingkan metode PM dan CAP.

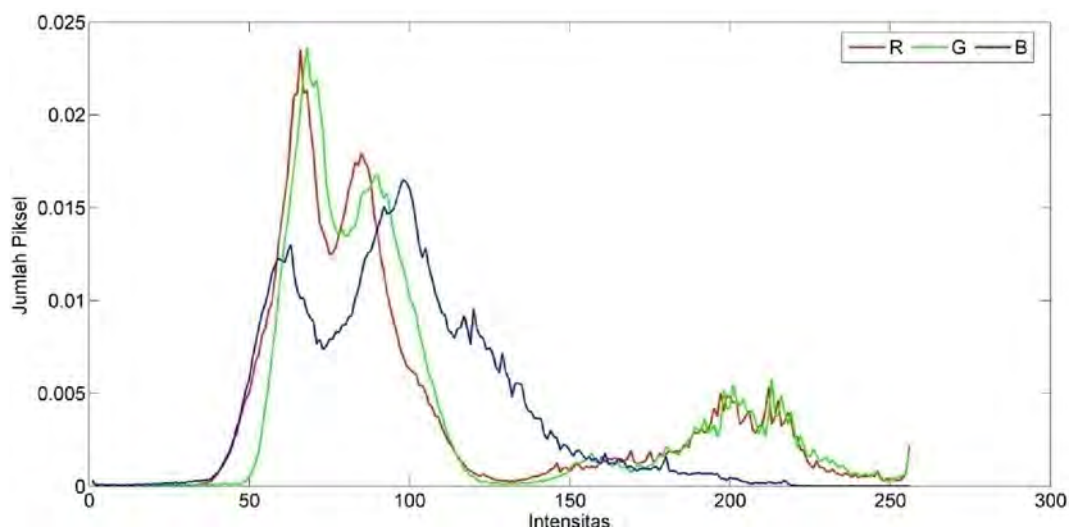


Gambar 4.20. Grafik perubahan standar deviasi antara sebelum dan sesudah *dehazing*. Garis warna biru adalah perubahan standar deviasi dari citra kabut sedangkan warna merah adalah standar deviasi dari citra setelah *dehazing*.

Sedangkan warna hijau pada Gambar 4.22 mewakili hasil dari metode CAP dan warna merah mewakili hasil dari metode NC. Nilai kontras dari DCP berada di posisi puncak dibandingkan dengan yang lain. Sedangkan metode PM berada tepat di bawah HGIR. Demikian pula jika dibandingkan dengan NC dan CAP, PM berada di bawah keduanya sebagaimana pada Gambar 4.21 dan Gambar 4.22. Jika diamati dengan histogram nilai RGB dari citra dengan kondisi kabut tipis, terjadi pergeseran distribusi data. Ketiga nilai RGB cenderung bergeser ke kiri atau mengalami penurunan intensitas sebagaimana pada Gambar 4.22 bila dibandingkan dengan sebelum reduksi. Pada Gambar 4.21 terjadi *peak* untuk ketiga saluran warna RGB karena pada kondisi ini dianggap ada kabut yang tebal atau adanya objek yang dianggap sebagai sumber cahaya.



Gambar 4.21. Grafik histogram dari kondisi citra dengan kondisi kabut tipis sebelum direduksi kabutnya.



Gambar 4.22. Grafik histogram dari kondisi citra dengan kondisi kabut tipis sebelum direduksi kabutnya.

4.6 Kekurangan metode Dark Channel Prior

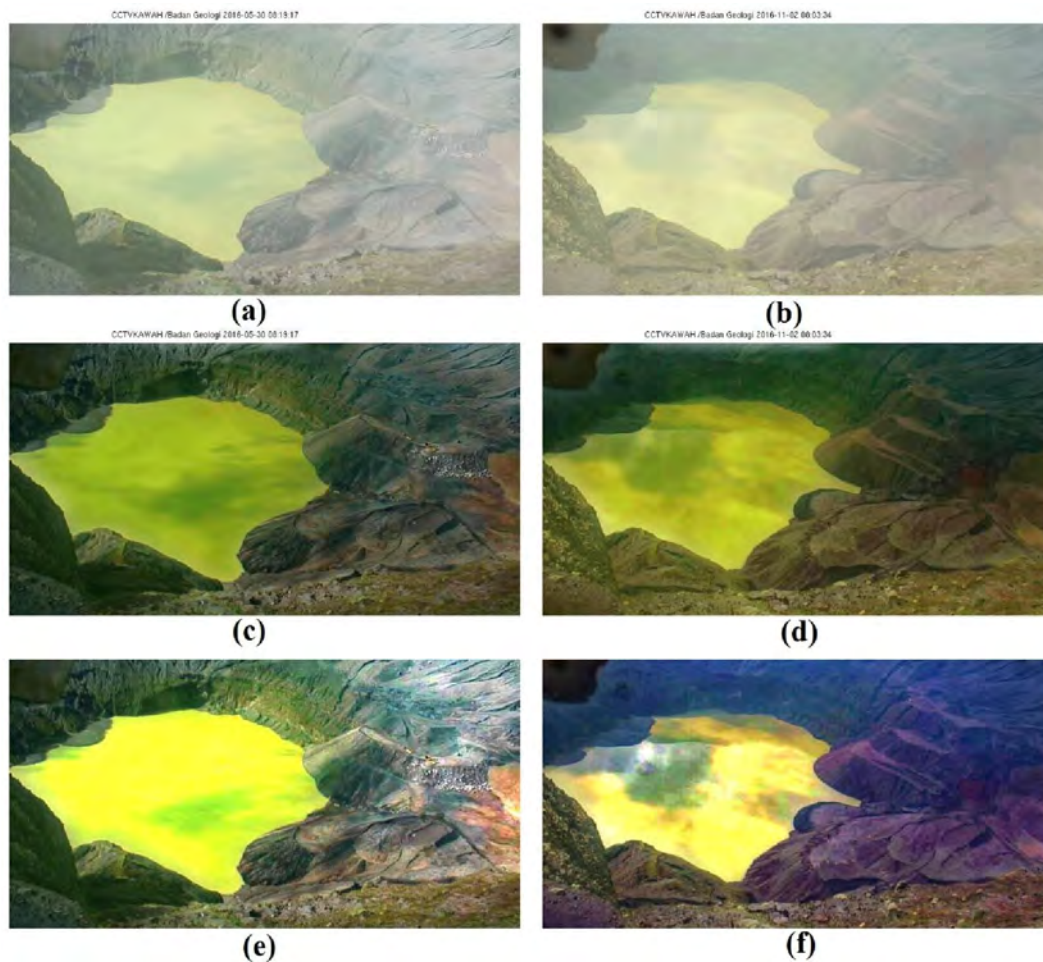
Suatu metode reduksi kabut selain memiliki kelebihan, tentunya juga akan memiliki kekurangan. Sifat dari permasalahan kabut itu sendiri adalah bersifat *ill-posed*. Artinya bahwa solusi dari permasalahan itu tidak lah unik. Kami akan memberikan penjelasan lebih rinci pada poin-poin berikut.

4.6.1 Oversaturasi

Umumnya, metode reduksi kabut atau *dehazing* sangat tergantung dengan akurasi estimasi peta transmisi. Metode DCP menggunakan persamaan (3.11) untuk melakukan estimasi peta transmisi. Dari persamaan (3.11) sangat bergantung dengan besarnya nilai A_c . Metode ini akan berjalan baik jika nilai A tidak terletak pada objek yang memiliki luminans tinggi sehingga akan dianggap sebagai sumber cahaya. Jika hal ini tidak terpenuhi, maka akan terjadi efek oversaturasi pada objek yang berluminans tinggi.

Citra yang ditangkap oleh kamera CCTV kemudian diolah oleh sistem memiliki label waktu dan tanggal dengan latar belakang berwarna putih. Awalnya, kami langsung memproses citra tersebut tanpa melakukan proses pemotongan atau *cropping*. Citra yang dihasilkan tidak menimbulkan efek oversaturasi. Kemudian, kami mengamati masing-masing peubah yang terlibat dalam proses kalkulasi. Kami menemukan besarnya nilai A selalu sama dengan 1. Jika A bernilai 1 maka objek tersebut memiliki intensitas tertinggi artinya objek tersebut murni berwarna putih. Padahal, pada data kami tidak ditemukan adanya objek yang berwarna putih. Setelah beberapa pengamatan, ternyata penyebab nilai A sama dengan 1 adalah label teks dengan warna latar belakang putih. Akhirnya, kami melakukan proses pemotongan label untuk data kami sebelum dilakukan proses reduksi kabut. Hasil yang kami peroleh setelah reduksi kabut dilakukan dengan pemotongan label menimbulkan efek oversaturasi pada warna kawah. Kami mengamati kembali lokasi nilai A pada citra kawah. Ternyata, warna kawah itu sendiri dianggap sebagai sumber cahaya. Adapun hasilnya bisa dilihat pada Gambar 4.6(c).

Setelah dihilangkan label tersebut, hasil pada citra yang dipulihkan cukup signifikan perbedaannya sebagaimana yang tampak pada Gambar 4.20. Hal ini menjawab asumsi kami bahwa metode estimasi peta transmisi secara umum estimasi nilai A secara khusus menjadi kunci utama proses pemulihan citra berkabut pada DCP.



Gambar 4.23. Citra hasil pemulihan dengan metode estimasi peta transmisi pada persamaan 3.11.(a),(b) adalah citra asli, (c),(d) adalah hasil *dehazing* dengan label waktu, (e),(f) adalah hasil *dehazing* tanpa label waktu

4.6.2 Efek Halo

Efek halo biasanya muncul untuk area tepi atau *edge* yang memiliki intensitas gradien yang besar. Efek ini biasanya produk dari proses blok. Pada Gambar 4.9 (c) dan (d) tampak halo efek muncul pada citra tepi danau kawah. Halo efek ini sudah diperbaiki pada penelitian sebelumnya dengan menggunakan metode *soft-matting* dan *guided image filter*[24], [25]. Namun, pada penelitian ini kami tidak membahas tentang *matting*. Sebagai gantinya, kami menerapkan metode CAP yang menggunakan estimasi peta transmisi dengan mengoptimalkan pendekatan estimasi kedalaman. Hasilnya terlihat pada Gambar 4.7 (c), (f), dan (i) di mana metode CAP bisa menghilangkan efek halo yang ditimbulkan dari perhitungan blok oleh DCP.

BAB 5

KESIMPULAN

Pada penelitian ini, metode berbasis DCP dengan menggunakan asumsi dan model peta kedalaman dari CAP diusulkan. Metode ini sanggup mengurangi kabut dari citra kawah gunung berapi Kelud.

Metode yang diusulkan dibandingkan dengan beberapa metode reduksi kabut yang populer seperti DCP, HGIR, NC, dan CAP. Metode HGIR dan CAP pada dasarnya dibangun di atas asumsi dari DCP. Namun, untuk metode CAP, perbedaan dengan metode DCP terletak pada proses estimasi cahaya atmosfer dan proses estimasi peta transmisi. Untuk metode DCP, proses estimasi cahaya atmosfer diambil dari domain warna citra *dark channel*. Sedangkan CAP mengambil porsi cahaya atmosfer dari intensitas tinggi dari citra peta kedalaman.

Metode estimasi peta transmisi yang digunakan oleh DCP sangat tergantung oleh besarnya nilai estimasi cahaya atmosfer. Sedangkan estimasi peta transmisi yang digunakan CAP bergantung dengan tingkat akurasi peta kedalaman. Kesalahan estimasi cahaya atmosfer yang digunakan oleh DCP akan menimbulkan efek oversaturasi untuk objek yang memiliki luminans tinggi dan dianggap sebagai sumber cahaya.

Nilai tingkat kontras untuk citra kabut kawah gunung berapi Kelud mengalami kenaikan ketika dilakukan proses reduksi kabut dengan rata-rata sebesar **0.1078**. Sedangkan nilai kecerahannya akan mengalami penurunan dengan rata-rata sebesar **-0.0662**. Dari data ini kami menarik kesimpulan bahwa citra yang direduksi dari kabut akan mengalami kenaikan nilai kontras dan penurunan untuk nilai kecerahannya. Kenaikan nilai kontras berkorelasi secara positif dengan tingkat visibilitas dari citra kawah Kelud.

Korelasi positif juga berlaku untuk kedalaman terhadap besarnya nilai saturasi dan kecerahan untuk data citra kawah gunung Kelud disamping citra pemandangan lainnya. Dengan adanya korelasi ini, peta kedalaman dari citra kawah gunung Kelud bisa diestimasi.

Adapun hasil perbandingan metode yang diajukan dengan metode-metode sebelumnya adalah nilai kontras tertinggi dipegang oleh metode DCP, kemudian diikuti dengan metode NC. Metode yang diajukan berada dalam posisi terbawah. Namun, metode yang diajukan tidak memberikan efek oversaturasi jika dibandingkan dengan metode DCP dan HGIR.

Warna citra hasil pemulihan sangat dipengaruhi oleh warna global. Sehingga warna yang dimunculkan belum sepenuhnya warna asli dari citra kawah. Oleh karena itu, untuk penelitian selanjutnya kami akan menggunakan beberapa metode untuk menampilkan warna asli setelah proses *dehazing* seperti *gamma correction*, *contrast enhancement*, dan sebagainya.

Selain itu, kunci dari metode CAP adalah akurasi estimasi kedalaman. Kami mengambil citra kawah dengan satu kamera. Untuk penelitian ke depan, kami akan menggunakan dua kamera untuk mengambil citra. Dengan dua kamera kami bisa melakukan estimasi kedalaman sehingga diperoleh data kedalaman dari citra kawah yang lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. C. Thouret, K. E. Abdurachman, J. L. Bourdier, and S. Bronto, "Origin, characteristics, and behaviour of lahars following the 1990 eruption of Kelud volcano, eastern Java (Indonesia)," *Bull. Volcanol.*, vol. 59, no. 7, pp. 460–480, 1998.
- [2] I. Pratomo, "Klasifikasi Gunung Api Aktif Indonesia , Studi Kasus dari Beberapa Letusan Gunung Api dalam Sejarah," *J. Geol. Indones. Vol. 1 No. 4 Desember 2006*, vol. 1, no. 4, pp. 209–227, 2006.
- [3] K. Kusumadinata, "Data dasar gunungapi Indonesia = Catalogue of references on Indonesian volcanoes with eruptions in historical time." Republik Indonesia, Departemen Pertambangan dan Energi, Direktorat Jenderal Pertambangan Umum, Direktorat Vulkanologi, [Bandung], p. xi, 820 , 1979.
- [4] J.-L. Bourdier, I. Pratomo, J.-C. Thouret, and P. M. Vincent, "Observations, stratigraphy and eruptive processes of the 1990 eruption of Kelut volcano, Indonesia," *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 79, no. 3–4, pp. 181–203, 1997.
- [5] K. Eka, P. Sofyan, S. Pretina, and S. B. Ugan, "Karakteristik kimiawi air danau kawah Gunung Api Kelud , Jawa Timur pasca letusan tahun 1990," *Indones. J. Geosci.*, vol. 1, no. 4, pp. 185–192, 2006.
- [6] P. Bani, C. Oppenheimer, J. C. Varekamp, T. Quiniou, M. Lardy, and S. Carn, "Remarkable geochemical changes and degassing at Vouli crater lake, Ambae volcano, Vanuatu," *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 188, no. 4, pp. 347–357, 2009.
- [7] Y. Miyabuchi, S. ichiro Ikebe, and K. Watanabe, "Geological constraints on the 2003-2005 ash emissions from the Nakadake crater lake, Aso Volcano, Japan," *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 178, no. 2, pp. 169–183, 2008.
- [8] Y. Nakashima, K. Heki, A. Takeo, M. N. Cahyadi, A. Aditiya, and K.

- Yoshizawa, “Atmospheric resonant oscillations by the 2014 eruption of the Kelud volcano, Indonesia, observed with the ionospheric total electron contents and seismic signals,” *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol. 434, pp. 112–116, 2016.
- [9] S. Andreastuti, E. Paripurno, H. Gunawan, A. Budianto, and D. Syahbana, “Character of community response to volcanic crises at Sinabung and Kelud volcanoes,” *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2017.
- [10] A. Jolly, B. Kennedy, M. Edwards, P. Jousset, and B. Scheu, “Infrasound tremor from bubble burst eruptions in the viscous shallow crater lake of White Island, New Zealand, and its implications for interpreting volcanic source processes,” *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 327, pp. 585–603, 2016.
- [11] P. Bani, G. Boudon, H. Balcone-Boissard, P. Delmelle, T. Quiniou, J. Lefevre, E. G. Bule, S. Hiroshi, and M. Lardy, “The 2009-2010 eruption of Gaua volcano (Vanuatu archipelago): Eruptive dynamics and unsuspected strong halogens source,” *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 322, pp. 63–75, 2016.
- [12] C. Horn, P. Metzler, K. Ullrich, M. Koschorreck, and B. Boehrer, “Science of the Total Environment Methane storage and ebullition in monimolimnetic waters of polluted mine pit lake Vollert-Sued , Germany,” *Sci. Total Environ.*, vol. 584–585, pp. 1–10, 2017.
- [13] P. Allard, M. Burton, G. Sawyer, and P. Bani, “Degassing dynamics of basaltic lava lake at a top-ranking volatile emitter: Ambrym volcano, Vanuatu arc,” *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol. 448, pp. 69–80, 2016.
- [14] C. Caudron, R. Campion, D. Rouwet, T. Lecocq, B. Capaccioni, D. Syahbana, Suparjan, B. H. Purwanto, and A. Bernard, “Stratification at the Earth’s largest hyperacidic lake and its consequences,” *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol. 459, pp. 28–35, 2017.
- [15] C. S. Hayer, G. Wadge, M. Edmonds, and T. Christopher, “Sensitivity of

- OMI SO₂ measurements to variable eruptive behaviour at Soufrière Hills Volcano, Montserrat,” *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 312, pp. 1–10, 2016.
- [16] X. Xi, M. S. Johnson, S. Jeong, M. Fladeland, D. Pieri, J. A. Diaz, and G. L. Bland, “Constraining the sulfur dioxide degassing flux from Turrialba volcano, Costa Rica using unmanned aerial system measurements,” *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 325, pp. 110–118, 2016.
 - [17] M. Gresse, J. Vandemeulebrouck, S. Byrdina, G. Chiodini, and P. P. Bruno, “Changes in CO₂ diffuse degassing induced by the passing of seismic waves,” *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 320, pp. 12–18, 2016.
 - [18] R. W. Henley and G. O. Hughes, “SO₂ flux and the thermal power of volcanic eruptions,” *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 324, pp. 190–199, 2016.
 - [19] C. Kern, J. Sutton, T. Elias, L. Lee, K. Kamibayashi, L. Antolik, and C. Werner, “An automated SO₂ camera system for continuous, real-time monitoring of gas emissions from Kīlauea Volcano’s summit Overlook Crater,” *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 300, pp. 81–94, 2014.
 - [20] G. Reikard, “Forecasting volcanic air pollution in Hawaii: Tests of time series models,” *Atmos. Environ.*, vol. 60, pp. 593–600, 2012.
 - [21] Q. Zhu, J. Mai, L. Shao, and S. Member, “A Fast Single Image Haze Removal Algorithm Using Color Attenuation Prior,” *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 24, no. 11, pp. 3522–3533, 2015.
 - [22] S. I. Kabanikhin, “Definitions and examples of inverse and ill-posed problems,” *J. Inverse Ill-Posed Probl.*, vol. 16, no. 4, pp. 317–357, 2008.
 - [23] R. Fattal, “Single Image Dehazing,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 27, no. 3, p. 72:1–72:9, Aug. 2008.
 - [24] K. He, J. Sun, and X. Tang, “Single image haze removal using dark channel prior,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 33, no. 12, pp.

2341–2353, 2011.

- [25] K. He, J. Sun, and X. Tang, “Guided Image Filtering,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 35, no. 6, pp. 1397–1409, 2013.
- [26] G. Meng, Y. Wang, J. Duan, S. Xiang, and C. Pan, “Efficient Image Dehazing with Boundary Constraint and Contextual Regularization,” in *2013 IEEE International Conference on Computer Vision*, 2013, pp. 617–624.
- [27] J. H. Kim, W. D. Jang, J. Y. Sim, and C. S. Kim, “Optimized contrast enhancement for real-time image and video dehazing,” *J. Vis. Commun. Image Represent.*, vol. 24, no. 3, pp. 410–425, 2013.
- [28] Q. Zhang, Y. Nie, L. Zhang, and C. Xiao, “Underexposed Video Enhancement via Perception-Driven Progressive Fusion,” *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 22, no. 6, pp. 1773–1785, 2016.
- [29] L. Zeng and Y. Dai, “Single Image Dehazing Based on Combining Dark Channel Prior and Scene Radiance Constraint,” *Chinese J. Electron.*, vol. 25, no. 6, pp. 1114–1120, 2016.
- [30] Y. Gao, H. M. Hu, S. Wang, and B. Li, “A fast image dehazing algorithm based on negative correction,” *Signal Processing*, vol. 103, pp. 380–398, 2014.
- [31] M. Yang, Z. Li, and J. Liu, “Super-pixel Based Single Image Haze Removal,” in *2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 2016, pp. 1965–1969.
- [32] B. Cai, X. Xu, K. Jia, C. Qing, and D. Tao, “DehazeNet: An End-to-End System for Single Image,” *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 25, no. 11, pp. 5187–5198, 2016.
- [33] S. G. Narasimhan and S. K. Nayar, “Vision and the Atmosphere,” *Int. J. Comput. Vis.*, vol. 48, no. 3, pp. 233–254, 2002.
- [34] S. G. Narasimhan and S. K. Nayar, “Chromatic framework for vision in

- bad weather,” in *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2000. *Proceedings. IEEE Conference on*, 2000, vol. 1, pp. 598–605 vol.1.
- [35] R. T. Tan, “Visibility in Bad Weather from a Single Image,” in *2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2008, pp. 1–8.
 - [36] K. He, “Single Image Haze Removal Using Dark Channel Prior,” The Chinese University of Hong Kong, 2011.
 - [37] J. McCartney, *Optics of the Atmosphere: Scattering by Molecules and Particles*. Wiley, 1976.
 - [38] P. Bouguer, *Traite’d’optique sur la gradation de la lumiere*. 1729.
 - [39] H. Israël and F. Kasten, “KOSCHMIEDERs Theorie der horizontalen Sichtweite,” in *Die Sichtweite im Nebel und die Möglichkeiten ihrer künstlichen Beeinflussung*, Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 1959, pp. 7–10.
 - [40] W. Zhang, J. Liang, H. Ju, L. Ren, E. Qu, and Z. Wu, “A robust haze-removal scheme in polarimetric dehazing imaging based on automatic identification of sky region,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 86, pp. 145–151, 2016.
 - [41] I. Riaz, T. Yu, H. Shin, and J. Piao, “Real-time single image dehazing using block-to-pixel interpolation and adaptive dark channel prior,” *IET Image Process.*, vol. 9, no. 9, pp. 725–734, 2015.
 - [42] O. V Putra, B. Prianto, E. M. Yuniarno, and M. H. Purnomo, “Visibility restoration of lake crater hazy image based on dark channel prior,” in *2016 International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC)*, 2016, pp. 1–6.
 - [43] H. Lu, Y. Li, S. Nakashima, and S. Serikawa, “Single Image Dehazing through Improved Atmospheric Light Estimation,” *CoRR*, vol. abs/1510.0, 2015.
 - [44] K. N. Liou, *An introduction to Atmospheric Radiation*. Academic Press,

2002.

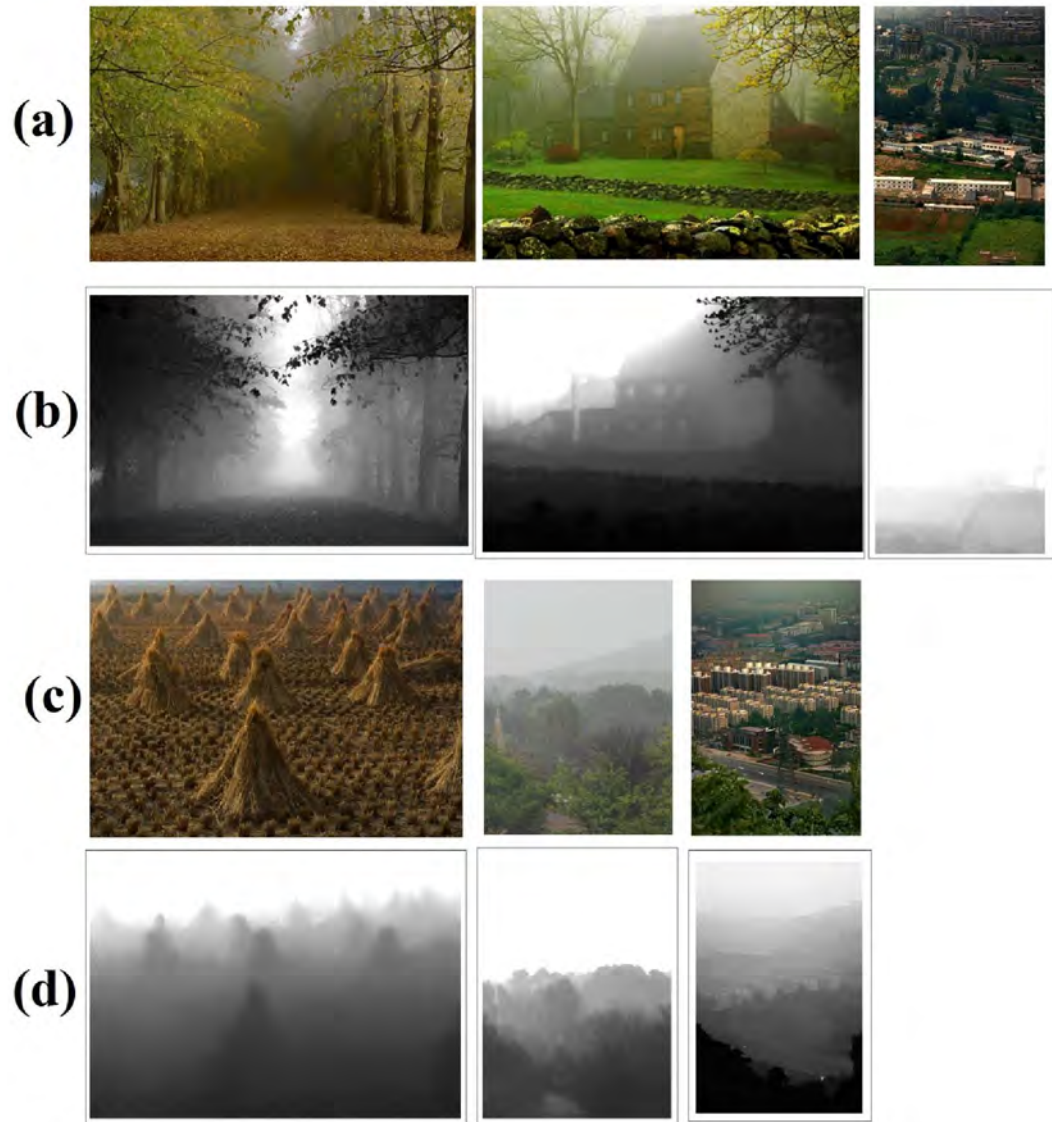
- [45] A. Galdran, J. Vazquez-coral, D. Pardo, and M. Bertalm, "Fusion-Based Variational Image Dehazing," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 24, no. 2, pp. 151–155, 2017.
- [46] S. Lee, S. Yun, J.-H. Nam, C. S. Won, and S.-W. Jung, "A review on dark channel prior based image dehazing algorithms," *EURASIP J. Image Video Process.*, vol. 2016, no. 1, p. 4, 2016.
- [47] J. Ulen, "Higher-Order Regularization in Computer Vision," Lund University, 2014.
- [48] Y. Zhang, "3D Information Extraction Based on GPU," Delft University of Technology, 2010.
- [49] C. McHardy, T. Horneber, and C. Rauh, "Spectral simulation of light propagation in participating media by using a lattice Boltzmann method for photons," *Appl. Math. Comput.*, vol. 0, pp. 1–12, 2017.
- [50] D. Coon, *Psychology: A Modular Approach to Mind and Behavior*. 2006.
- [51] M. S. Zhdanov, *Inverse Theory and Applications in Geophysics, Second Edition*, Second edi. Elsevier, 2015.
- [52] S. C. Huang, B. H. Chen, and W. J. Wang, "Visibility restoration of single hazy images captured in real-world weather conditions," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 24, no. 10, pp. 1814–1824, 2014.
- [53] I. J. Myung, "Tutorial on maximum likelihood estimation," *J. Math. Psychol.*, vol. 47, no. 1, pp. 90–100, 2003.
- [54] J. Kopf, B. Neubert, B. Chen, M. F. Cohen, D. Cohen-Or, O. Deussen, M. Uyttendaele, and D. Lischinski, "Deep Photo: Model-Based Photograph Enhancement and Viewing," *ACM Trans. Graph. (Proceedings SIGGRAPH Asia 2008)*, vol. 27, no. 5, p. 116:1--116:10, 2008.
- [55] E. Peli, "Contrast in complex images.," *J. Opt. Soc. Am. A.*, vol. 7, no. 10,

pp. 2032–2040, 1990.

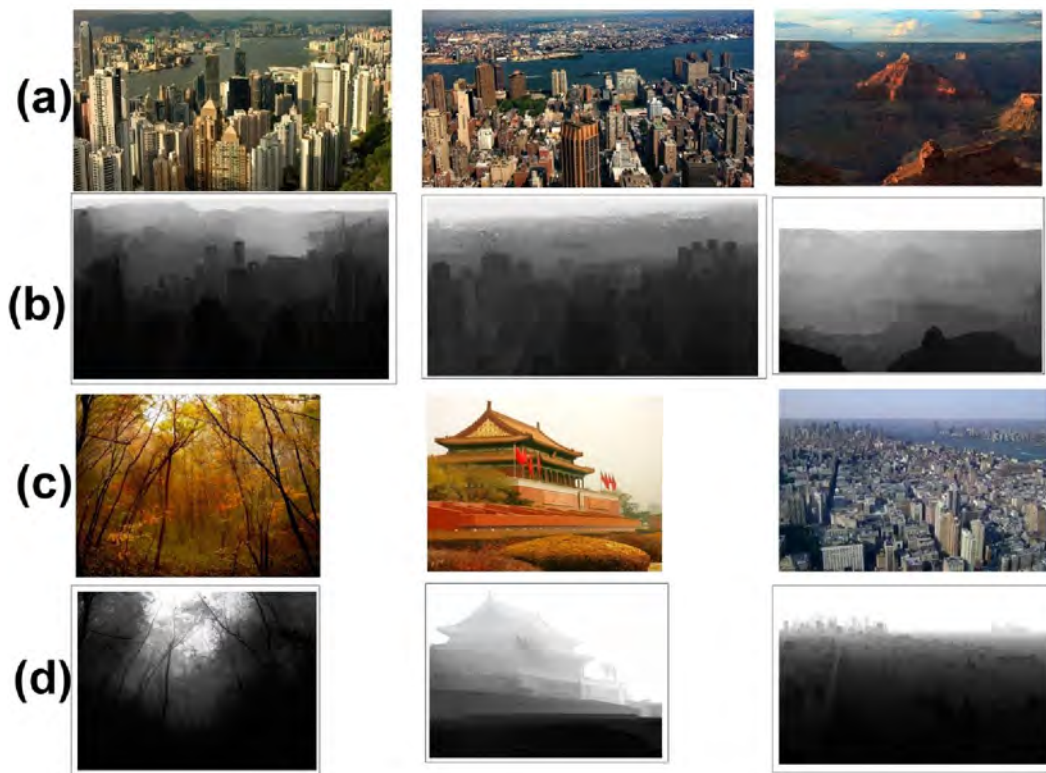
- [56] A. A. Michelson, *Studies in Optics*. University of Chicago Press, 1927.
- [57] X. Pan, F. Xie, Z. Jiang, and J. Yin, “Haze Removal for a Single Remote Sensing Image Based on Deformed Haze Imaging Model,” *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 22, no. 10, pp. 1806–1810, 2015.
- [58] B. H. Chen, S. C. Huang, and F. C. Cheng, “A high-efficiency and high-speed gain intervention refinement filter for haze removal,” *J. Disp. Technol.*, vol. 12, no. 7, pp. 753–759, 2016.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

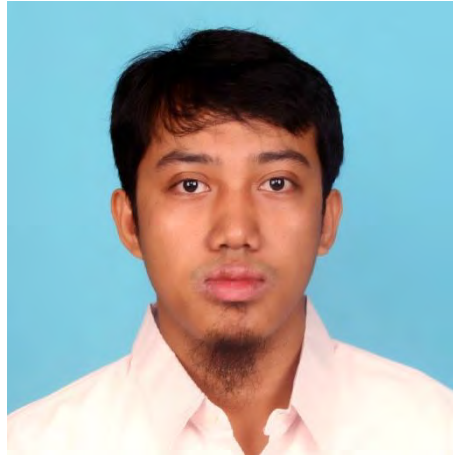


Gambar 5.1. Beberapa citra yang digunakan sebagai data latih untuk LSE. (a) dan (c) adalah citra pemandangan luar, (b) dan (d) adalah citra kedalaman dari citra pemandangan luar terkait.



Gambar 5.2. Beberapa citra yang digunakan sebagai data latih untuk LSE. (a) dan (c) adalah citra pemandangan luar seperti bangunan, (b) dan (d) adalah citra kedalaman dari citra pemandangan luar terkait.

BIODATA



I. Data Pribadi

1. Nama : Oddy Virgantara Putra
2. Tempat/Tanggal Lahir : Kediri, 24 Agustus 1988
3. Agama : Islam
4. Alamat : Jalan Garuda RT 03 RW 01 Dukuh Krajan
Desa Serangan Kecamatan Mlarak Kabupaten Ponorogo, Propinsi
Jawa Timur.
5. Email : oddy@unida.gontor.ac.id

II. Riwayat Pendidikan

Pendidikan Dasar dan Menengah

No	Tingkat Pendidikan	Nama Sekolah	Lulus Tahun
1	SD	SD Negeri 1 Ngadiluwih	2001
2	SMP	SMP Negeri 1 Ngadiluwih	2004
3	SMA	SMA Negeri 2 Kediri	2007

Pendidikan Tinggi

No	Perguruan Tinggi	Gelar	Lulus	Jurusan
1	Institut Teknologi Sepuluh Nopember	S.Kom	2012	Sistem Informasi

III. Publikasi

1. O. V Putra, B. Prianto, E. M. Yuniarno, and M. H. Purnomo, "Visibility restoration of lake crater hazy image based on dark channel prior," in *2016 International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC)*, 2016, pp. 1–6.
2. O. V. Putra, B. Prianto, A. Prayitno, E. I. Setiawan, E. M. Yuniarno, and M. H. Purnomo, "A Novel Approach on Dehazing Volcanic Crater Lake Hazy Scene Videos Based on Color Attenuation Prior," *Int. Rev. Comput. Softw.*, vol. 12, no. January, pp. 40–53, 2017.